



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Química

**Diseño de un sistema de recirculación de End
Flash Gas para reforma de un proceso de
licuefacción de Gas Natural.**

Autor:

Erquicia Bolibar, Miren

Tutor:

**Mato Chaín, Fidel
Ingeniería Química y Tecnología del
Medio Ambiente**

Valladolid, julio 2023.

RESUMEN

Se lleva a cabo la Simulación del proceso de licuefacción del gas natural a través del simulador comercial ASPEN Plus con el fin de establecer los fundamentos de la influencia que tiene añadir una recirculación de parte de la corriente de End Flash Gas (EFG) a la entrada del proceso, con vistas a la optimización de este. Se comparan el proceso de licuefacción simple, sin recirculación, con distintas perturbaciones en la composición de nitrógeno, y el proceso del mismo sistema con diferentes caudales de recirculación de la corriente EFG y reaprovechamiento de la energía desechada por la purga. Se incluye el diseño del compresor utilizado en la recirculación.

PALABRAS CLAVE

Gas natural, Licuefacción, Topología de proceso, Gas de cabezas de flash (EFG), Compresor.

ABSTRACT

The Simulation of the natural gas liquefaction process through the ASPEN Plus commercial simulator is carried out. The objective is to establish the basics of the influence of adding a recirculation of part of the End Flash Gas (EFG) stream at the process inlet, with the aim of process optimization. The simple liquefaction process without recirculation with different perturbations in the nitrogen composition is compared to the process of the same system with different recirculation flow rates of the EFG stream and reuse of the energy discarded by the purge. The design of the compressor used in the recirculation is included.

KEYWORDS

Natural gas, Liquefaction, Process Topology, End Flash Gas (EFG), Compressor.

OBJETIVOS

Los objetivos del trabajo son:

- Establecer los fundamentos teóricos del proceso de licuefacción del gas natural utilizando el simulador ASPEN Plus.
- Evaluar el impacto de la adición de una recirculación de parte de la corriente de EFG en la eficiencia y rendimiento del proceso de licuefacción.
- Comparar los resultados obtenidos del proceso de licuefacción simple sin recirculación con distintas perturbaciones en la composición de nitrógeno.
- Analizar los efectos de diferentes caudales de recirculación de la corriente EFG y el reaprovechamiento de la energía desechada por la purga en el proceso de licuefacción.
- Diseñar un compresor adecuado para la recirculación de la corriente EFG y evaluar su impacto en el rendimiento global del proceso.
- Proporcionar recomendaciones y conclusiones sobre la viabilidad y eficiencia de la recirculación de parte de la corriente EFG en el proceso de licuefacción del gas natural

Al lograr estos objetivos, se espera contribuir al conocimiento científico sobre la comprensión y la optimización del proceso de licuefacción del gas natural y ofrecer pautas para mejorar su eficiencia y rendimiento mediante la implementación de la recirculación de la corriente EFG y el reaprovechamiento de la energía desechada.

INDICE

RESUMEN	3
PALABRAS CLAVE.....	3
ABSTRACT	3
KEYWORDS	3
OBJETIVOS	5
GLOSARIO	9
Introducción.....	11
1.- Aspectos generales del GN	11
1.1.- Composición del GN.....	11
1.2.- Tipos de GN en función del yacimiento	12
1.2.1.-Gas seco:	12
1.2.3.- Gas no convencional:	15
1.2.4.-Biogás:.....	17
1.3.- Situación actual y perspectivas del GN a nivel España y mundial	17
1.4.- Ventajas del GN frente a otras fuentes de energía.....	25
1.5.- Utilización de cada energía en el mundo	27
2.- Aspectos generales del GN licuado.....	31
2.1.- Situación actual y perspectivas del GNL a nivel España y mundial.....	32
2.1.1.-Situación actual del GNL a nivel España:	32
2.1.2.-Situación actual del GNL a nivel mundial:.....	35
2.2.- Descripción de la licuefacción del GN	36
2.3.- Etapas del proceso	37
2.3.1.- Eliminación de impurezas	37
2.3.2.- Enfriamiento	39
2.4.- Tecnologías de licuefacción de GN	40
3.- Aspectos generales de la recirculación del GN licuado	43
4.- Análisis de la influencia de la recirculación.....	45
4.1 Variación de nitrógeno en la alimentación	45
4.2 Recirculación	53
4.3- Compresor.....	61
4.4. Balance energético y económico.....	63

5.- Conclusiones	65
6.- Bibliografía	67
7.- Anexo tablas, gráficas, ficha técnica del compresor	69
7.1 Gráficas	69
7.2 Tablas	71
7.3 Ficha técnica del compresor.....	76

GLOSARIO

GN Gas Natural

GNL.....Gas Natural Licuado

NGNatural Gas

LNGLiquefied Natural Gas

EFG.....End Flash Gas. Gas de salida por cabezas en el Flash.

ICEInformación Comercial Española (Ministerio de Industria, Comercio y Turismo)

bcm.....1.000 millones de metros cúbicos de gas natural

AIE.....Agencia Internacional de la Energía

Introducción

1.- Aspectos generales del GN

1.1.- Composición del GN

El gas natural (GN) es una mezcla de hidrocarburos gaseosos que se encuentra en yacimientos subterráneos y se utiliza fundamentalmente como fuente de energía, y en menor medida como materia prima. La composición exacta del GN puede variar según su origen y la ubicación del yacimiento, pero en general, se compone principalmente de metano (CH_4) en un 70-90% en volumen.

Además del metano, el GN también puede contener pequeñas cantidades de otros hidrocarburos gaseosos, como etano (C_2H_6), propano (C_3H_8), butano (C_4H_{10}) y pentano (C_5H_{12}), así como trazas de gases no hidrocarburos como nitrógeno, dióxido de carbono, helio, hidrógeno sulfuroso y otros compuestos orgánicos e inorgánicos, entre ellos, frecuentemente, agua. La presencia de estos componentes varía según la fuente del GN y la forma en que se extrae. La composición principal del GN es el metano (CH_4), aunque también contiene etano (C_2H_6), propano (C_3H_8), butano (C_4H_{10}) y pentano (C_5H_{12}) [1].

Una composición habitualmente tomada como promedio es:

- 85% moles de metano
- 10% moles de etano
- 3% moles de propano
- 0,1% moles de butano
- 0,7% moles de nitrógeno
- 1,2% moles de impurezas (azufre, mercurio, hidrógeno, dióxido de carbono, monóxido de carbono, agua, etc.)

Tabla 1. Típica composición del GN [2].

Compound	Molar fraction
Hydrocarbons	
Methane	0.75 – 0.99
Ethane	0.01 – 0.15
Propane	0.01 – 0.10
<i>n</i> -Butane	0.00 – 0.02
Isobutene	0.00 – 0.01
<i>n</i> -Pentane	0.00 – 0.01
Isopentane	0.00 – 0.01
Hexane	0.00 – 0.01
Heptane plus higher hydrocarbons	0.00 – 0.001
Nonhydrocarbons	
Nitrogen	0.00 – 0.15
Carbon dioxide	0.00 – 0.30
Hydrogen sulfide	0.00 – 0.30
Helium	0.00 – 0.05

1.2.- Tipos de GN en función del yacimiento

Existen diferentes tipos de GN que se pueden obtener según el pozo del cual se extrae. A continuación, se describen los principales tipos de GN:

1.2.1.-Gas seco: también conocido como gas metano o gas natural seco, es el tipo de GN más común. Se compone principalmente de metano (alrededor del 90% o más) y puede contener pequeñas cantidades de otros hidrocarburos como etano, propano y butano. El gas seco se obtiene a través de un proceso de purificación del gas natural crudo. El GN crudo es una mezcla de hidrocarburos gaseosos que incluye metano (CH₄), así como otros gases como etano (C₂H₆), propano (C₃H₈), butano (C₄H₁₀) y trazas de gases inertes y contaminantes.

El proceso de obtención de gas seco implica varias etapas de tratamiento y purificación para eliminar los componentes no deseados y obtener un gas con un

alto contenido de metano. A continuación, se describen las etapas típicas del proceso:

Separación inicial: El GN crudo se separa de los líquidos de hidrocarburos asociados, como el petróleo y los condensados, a través de procesos de separación en la planta de procesamiento.

Eliminación de líquidos y sólidos: El gas crudo puede pasar por separadores de líquidos y filtros para eliminar cualquier líquido residual, como agua y aceite, así como partículas sólidas.

Eliminación de componentes pesados: Se utilizan unidades de extracción para eliminar los hidrocarburos más pesados, como etano, propano y butano, que se pueden utilizar como productos de valor agregado por separado.

Eliminación de contaminantes: Se llevan a cabo procesos de tratamiento adicionales para eliminar contaminantes, como dióxido de carbono (CO₂), sulfuro de hidrógeno (H₂S) y otros compuestos no deseados presentes en el GN crudo.

Deshidratación: Se utiliza un proceso de deshidratación para eliminar la humedad presente en el GN. Esto puede implicar el uso de tecnologías como el secado con glicol o el uso de tamices moleculares.

Fraccionamiento: En algunos casos, se puede llevar a cabo un proceso de fraccionamiento para separar los componentes del GN en productos individuales según sus puntos de ebullición.

Al final de este proceso de tratamiento y purificación, se obtiene el gas seco, que consiste principalmente en metano (CH₄) con un contenido de impurezas muy bajo. El gas seco es el tipo de GN que se utiliza ampliamente en aplicaciones.

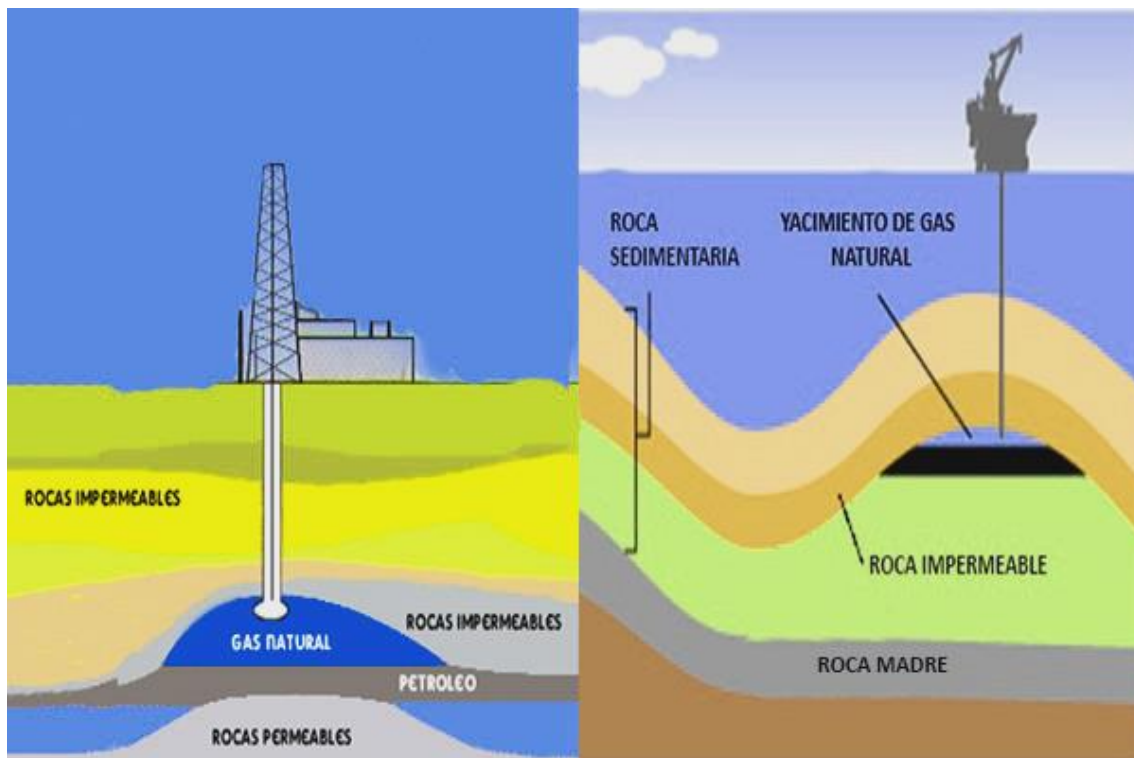


Figura 1. Tipos de yacimientos de GN.[3]

1.2.2.- Gas húmedo: también conocido como gas asociado, es un GN que se encuentra acompañando a yacimientos de petróleo crudo. Este gas contiene hidrocarburos líquidos como butano, propano y etano, además de metano. El gas húmedo se procesa para separar los líquidos del gas y producir GN seco. El GN húmedo se obtiene de forma similar al gas seco, pero no se somete al mismo nivel de procesamiento para eliminar los componentes más pesados. El GN húmedo contiene una mayor proporción de hidrocarburos más pesados, como etano, propano, butano y trazas de otros hidrocarburos más pesados.

Las etapas principales involucradas en la obtención del GN húmedo son:

- Extracción del yacimiento: El GN se extrae del subsuelo utilizando técnicas de perforación, como pozos de gas convencionales o no convencionales, como pozos de gas de esquistos o gas de lutitas.

- Separación inicial: Al igual que con el gas seco, se separa el GN de los líquidos asociados y sólidos en la planta de procesamiento. Sin embargo, en el caso del GN húmedo, los líquidos de hidrocarburos, como el petróleo y los condensados, se mantienen mezclados con el gas.
- Procesamiento de gas: El GN húmedo se somete a un proceso de tratamiento para eliminar los contaminantes y los productos no deseados, como el dióxido de carbono (CO₂), el sulfuro de hidrógeno (H₂S) y otros componentes no gaseosos. Esto puede implicar el uso de tecnologías como el proceso de aminas o el proceso de absorción con solventes.
- Separación de componentes líquidos: En esta etapa, se lleva a cabo la separación de los líquidos de hidrocarburos más pesados, como etano, propano y butano, de la corriente de GN húmedo. Estos líquidos se pueden recuperar y comercializar como productos valiosos.
- Fraccionamiento: En algunos casos, se realiza un proceso adicional de fraccionamiento para separar los componentes del GN en productos individuales según sus puntos de ebullición. Esto permite obtener productos como el etano, el propano, el butano y otros hidrocarburos más pesados.

El GN húmedo se utiliza principalmente en aplicaciones industriales, como materia prima en la producción de productos petroquímicos y como fuente de energía en procesos de alta demanda energética. También se puede procesar y purificar aún más para obtener GN seco, que es el tipo de gas utilizado en aplicaciones comerciales, residenciales y de generación de electricidad.

1.2.3.- Gas no convencional: se refiere a GN que se encuentra en formaciones rocosas que no son fácilmente accesibles. Esto incluye el gas de esquisto, el gas de lutita y el gas de carbón. La extracción de este gas implica técnicas especiales, como la fracturación hidráulica, para liberar el gas atrapado en la roca.

El fracking, también conocido como fracturación hidráulica, es una técnica utilizada para extraer GN y petróleo de yacimientos subterráneos no convencionales, como los yacimientos de esquisto (shale) y los de gas de lutitas (tight gas) [4].

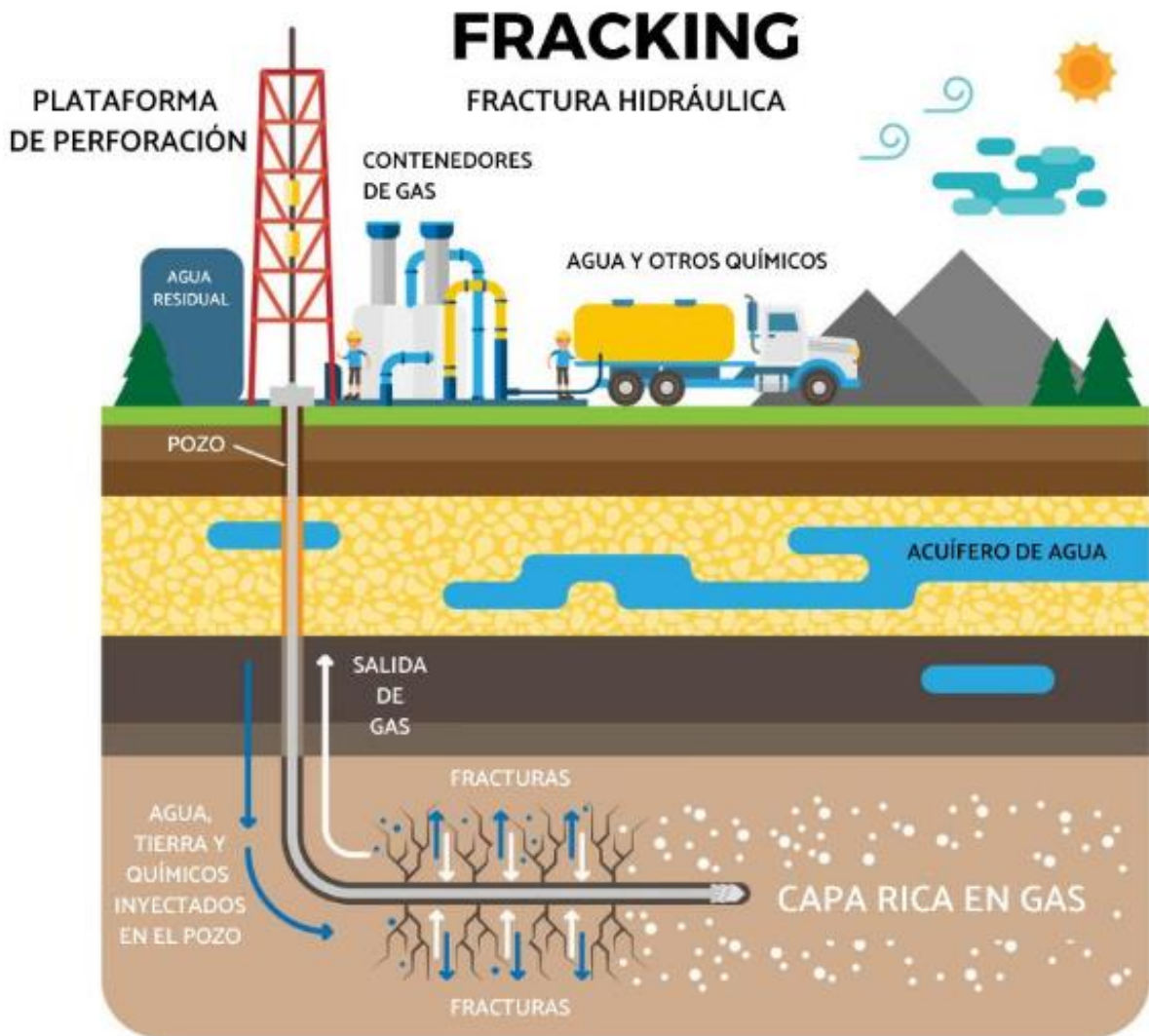


Figura 2. Esquema de Fracking.

El proceso de fracking implica la inyección de grandes volúmenes de agua, arena y aditivos químicos a alta presión en un pozo de perforación para crear fisuras en la roca madre que contiene el GN. Estas fisuras permiten que el gas fluya hacia el pozo y pueda ser extraído.

El agua inyectada, mezclada con arena y aditivos químicos, ayuda a abrir y sostener las fisuras en la roca. La arena, llamada "arena de fractura" o "arena de sostén", actúa como agente de sostén para mantener abiertas las fisuras y permitir que el gas fluya hacia el pozo. Los aditivos químicos se utilizan para diversos fines, como reducir la fricción, prevenir el crecimiento de bacterias y mejorar el rendimiento del proceso.

Una vez que se ha realizado la fracturación hidráulica, el GN y los fluidos de retorno (agua y aditivos químicos utilizados) son recuperados a través del pozo y se procesan para su uso y comercialización.

El fracking ha permitido el desarrollo y la producción de grandes cantidades de GN en áreas que antes no eran económicamente viables. Sin embargo, esta técnica también ha generado preocupaciones debido a los posibles impactos ambientales, como la contaminación del agua, la liberación de metano (un potente gas de efecto invernadero) y los riesgos de actividad sísmica inducida, conllevando una importante contestación social y mediática.

1.2.4.-Biogás: se produce a partir de materia orgánica en descomposición, como residuos de alimentos y estiércol animal. Este gas se puede utilizar como combustible y es una forma de energía renovable.

Cabe destacar que la composición y las propiedades del GN pueden variar según su origen geográfico y su yacimiento. Además, la presencia de impurezas y otros componentes en el GN puede afectar su calidad y la forma en que se procesa y utiliza.

1.3.- Situación actual y perspectivas del GN a nivel España y mundial

En la Figura 3, se representa el proceso completo del GN desde la extracción a la distribución. Fundamentalmente está constituido por tres fases: La extracción; El transporte; La distribución.[5]

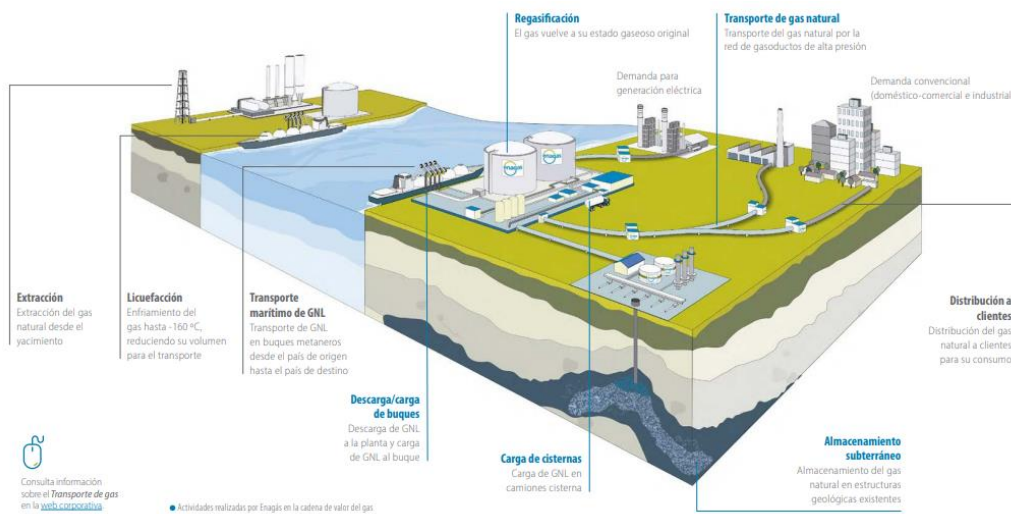


Figura 3. Proceso de distribución del GN.

A continuación, en la Figura 4 se muestra el esquema de la distribución desde que el GN es obtenido como materia prima hasta sus consumidores, como la domestica o la industria.

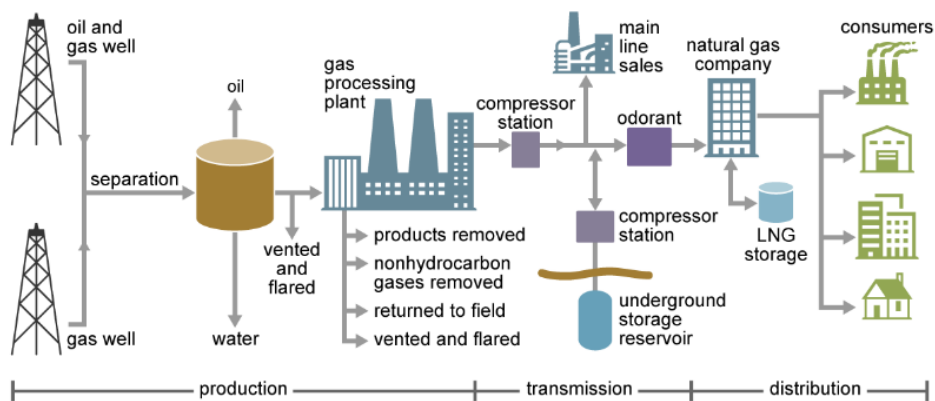


Figura 4. Producción y distribución del GN.[6]

En el caso de España, el sistema gasístico implantado actualmente es el representado en la Figura 5.

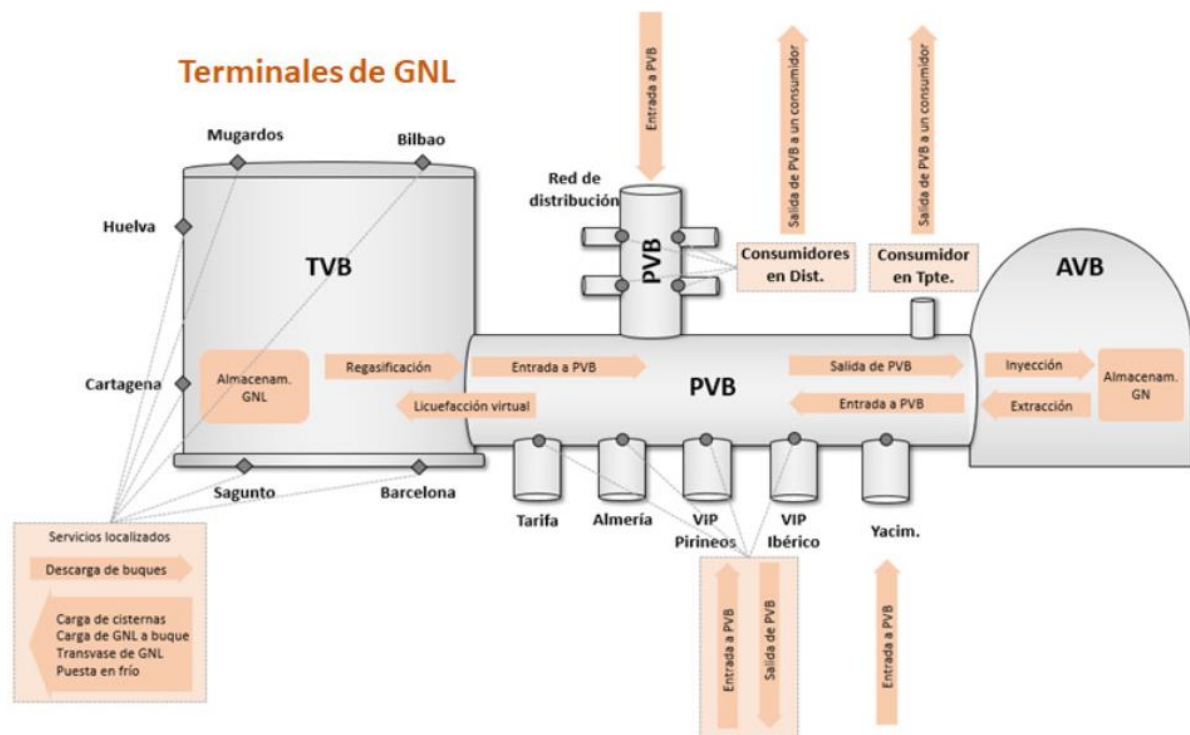


Figura 5. Sistema del GN español.

En la Figura 5 se representan los orígenes y los usos del gas natural en España [7],

En cuanto a las fuentes, se pueden ver:

- Los 6 terminales marítimas en funcionamiento de GNL (Barcelona, Sagunto, Cartagena, Huelva, Mugardos y Bilbao), y ya está preparada otra terminal en Gijón para entrar en servicio, conformando lo que llama el TVB (Tanque virtual de Balance, que es la capacidad de almacenamiento de GNL).
- Los cuatro gaseoductos que conectan España, dos con Francia (1 a través de Guipúzcoa y otro a través de Navarra) y dos con Argelia (que entran uno por Almería y el otro por Tarifa, después de atravesar Marruecos) Punto Virtual de Balance (PVB) para la red nacional de gasoductos de transporte y distribución
- Los yacimientos de GN dentro del país,

En cuanto a los usos del GN en España en la figura XX están representados los flujos de distribución bien por gaseoducto o bien por transporte.

Además, también viene reflejado los cuatro almacenes subterráneos de GN (que son el de Serrablo en Huesca, La Gaviota en Vizcaya, Yela en Guadalajara y YEGNA en

Tarragona) que existen en España (Almacenamiento Virtual de Balance AVB y el Tanque Virtual de Balance (TVB) para toda la capacidad de almacenamiento y regasificación de las seis plantas de GNL del sistema.

La demanda de GN ha ido en aumento tanto en España como en el mundo en las últimas décadas, esto se muestra en la Figura 6.

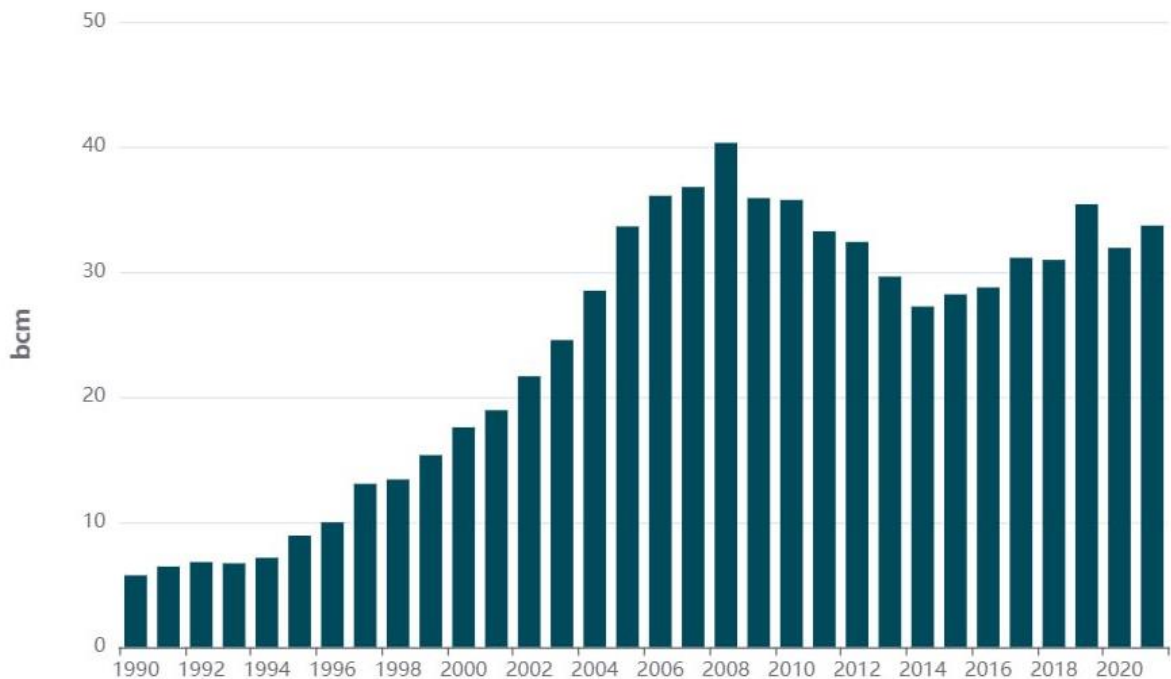


Figura 6. Crecimiento del consumo de GN en los últimos 30 años [8].

En España, la demanda de GN ha crecido significativamente desde principios de los años 90, cuando se empezó a introducir este combustible en el país. Según datos de la Asociación Española del Gas (SEDIGAS), en 1990 el consumo de GN en España era de 1.000 millones de metros cúbicos (m³), mientras que en 2020 se alcanzó una cifra de 38.584 millones de m³.

La demanda total de gas en España crece un 5%, situándose en 378 TWh. En 2021 la demanda total de GN creció en España un 5,1% con respecto al año 2020,

situándose en los 378,4 TWh. Se trata de una cifra un 9,2% superior a la media de los últimos diez años y la segunda más alta desde 2011.

El crecimiento de la demanda de gas se debió en gran medida al aumento de la actividad económica tras el parón de 2020 causado por la pandemia y a las temperaturas más frías registradas durante el temporal Filomena a principios de año.

Por sectores, la demanda convencional (hogares, comercios e industria), registró un incremento del 6,2% alcanzando los 288 TWh. Dentro de este sector, el consumo doméstico-comercio y pymes experimentó un incremento del 7,6%, alcanzando los 63,3 TWh, debido al aumento de clientes (18.000 nuevos suministros) y a las temperaturas más frías.

La demanda de gas experimentó su principal aumento durante la ola de frío registrada entre el 1 y el 17 de enero, registrándose un incremento extraordinario de 3.760 GWh respecto a los valores previstos en condiciones normales de temperatura. El 12 de enero de 2021 se registró un récord de demanda convencional, alcanzando 1.298 GWh/d y superando el valor máximo anterior de 1.249 GWh/d registrado el 3 de febrero de 2012.

Por su parte, el consumo industrial creció un 5,8% comparado con el año anterior, alcanzando los 224,7 TWh. Por sectores, creció especialmente el consumo de la construcción (+17,8%), servicios (+13,1%) y metalurgia (+9,1%).

En comparación con el año pasado, la demanda industrial creció especialmente al final del primer trimestre, debido a la paralización de la actividad económica debido a la pandemia durante este periodo en 2020.

La demanda de gas para generación eléctrica aumentó un 1,7 % hasta alcanzar los 90,4 TWh, la segunda cifra más alta de demanda desde 2011. Este aumento se debe

principalmente a una menor producción de energía hidráulica y menor disponibilidad del parque de generación nuclear.

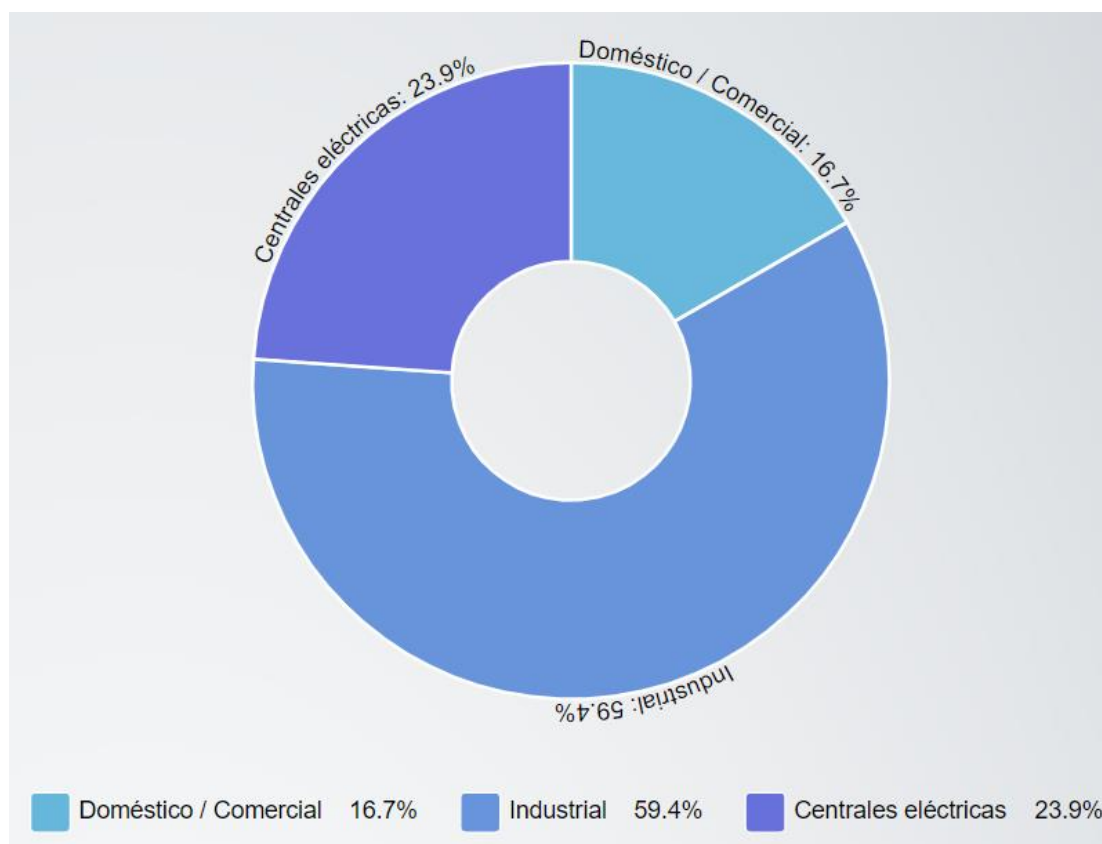


Figura 7. Distribución de la demanda por sectores (2021) [5].

La demanda total de electricidad en España en 2021 fue un 2,5% superior a la de 2020, según datos de Red Eléctrica Española y las principales tecnologías para cubrir la demanda fueron la eólica (24%); la nuclear (22%) y los ciclos combinados (15%). En este sentido, hay que destacar el papel de los ciclos combinados, que evitaron un colapso del sistema eléctrico en medio de un temporal de frío y nieve sin precedentes, garantizando con su flexibilidad y eficiencia el suministro eléctrico a hogares e industrias. A excepción de Castilla-La Mancha, todas las comunidades autónomas han registrado incrementos de consumo en 2021 respecto al año anterior. Cataluña, Comunidad Valenciana, Andalucía y Comunidad de Madrid fueron las comunidades autónomas con mayores consumos de GN. El consumo combinado de todas ellas supone la mitad del consumo total de GN en España. La Figura 5 está realizada con los datos obtenidos del informe anual de gas en España [5].

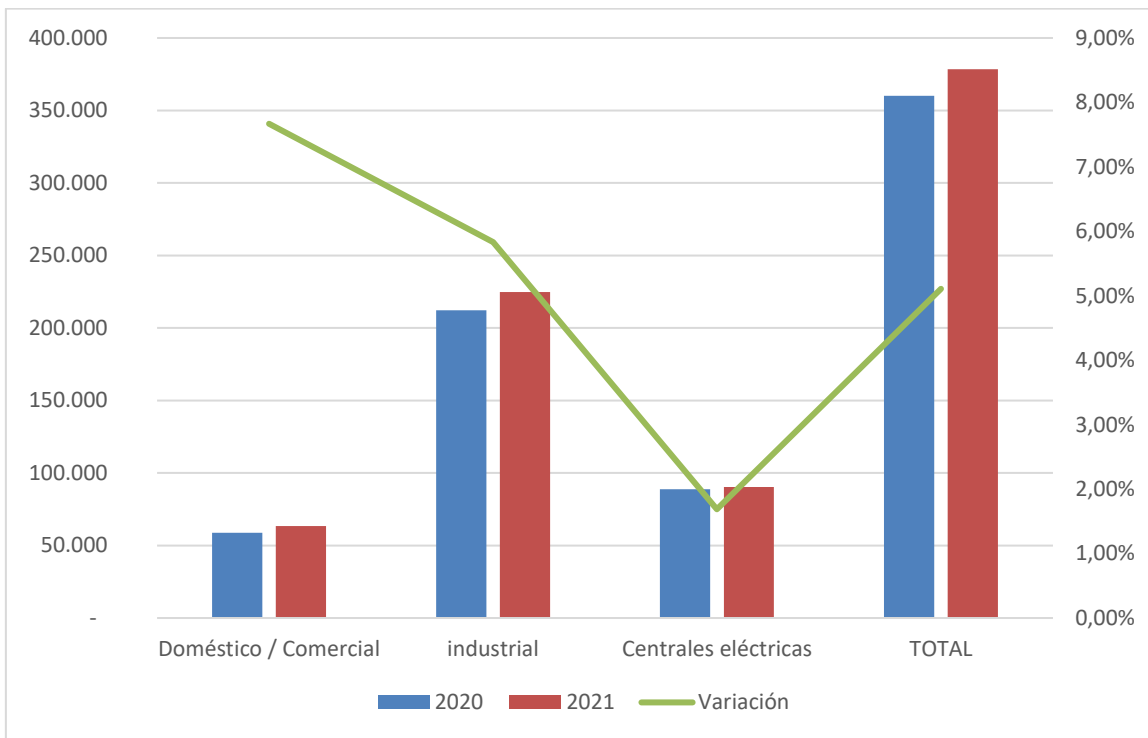


Figura 8. Demanda de GN en España.

Realizado en base a los datos del informe de Enagas 2022 [5] sobre la evolución de la demanda de GN en España 2021/2022, Queda representado en la Figura 9.

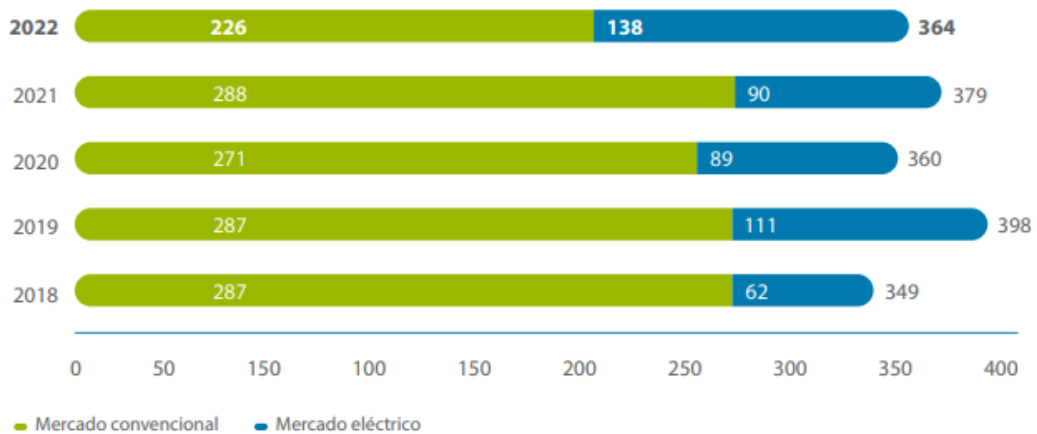


Figura 9. Evolución anual de la demanda de GN (TWh/año) [5].

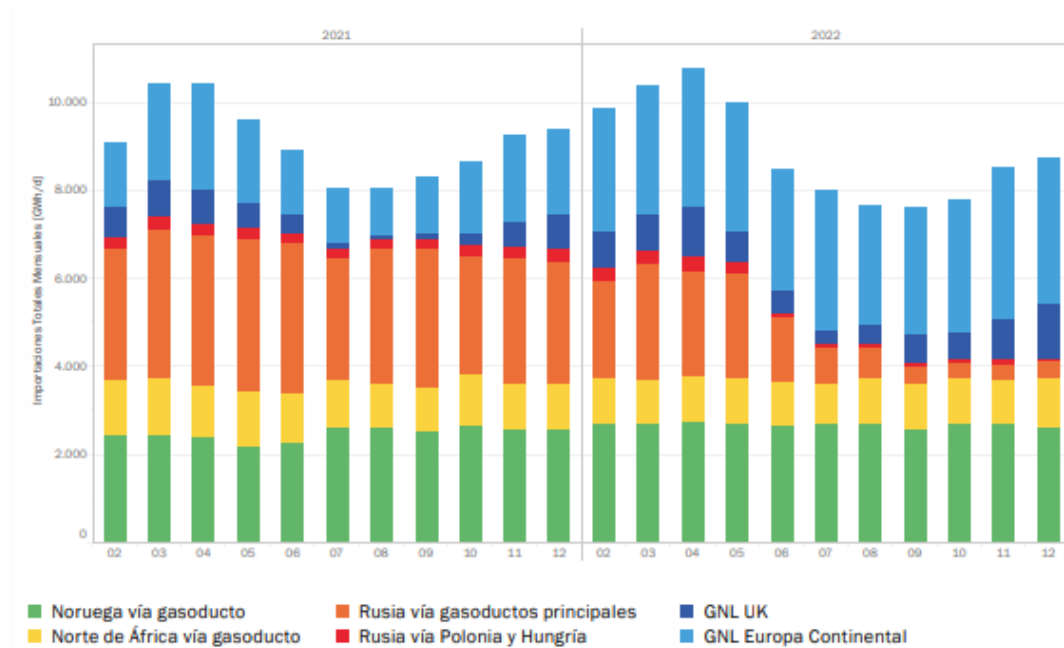


Figura 10. Importaciones de gas a Europa.

En el mundo, la demanda de GN también ha experimentado un aumento constante en las últimas décadas. Según datos de la Agencia Internacional de Energía (AIE), la demanda mundial de GN aumentó en un 2,8% en 2019, alcanzando un total de 3.958 millones de toneladas de petróleo equivalente (toe). La AIE prevé que la demanda mundial de GN continúe creciendo en los próximos años, aunque a un ritmo más moderado.

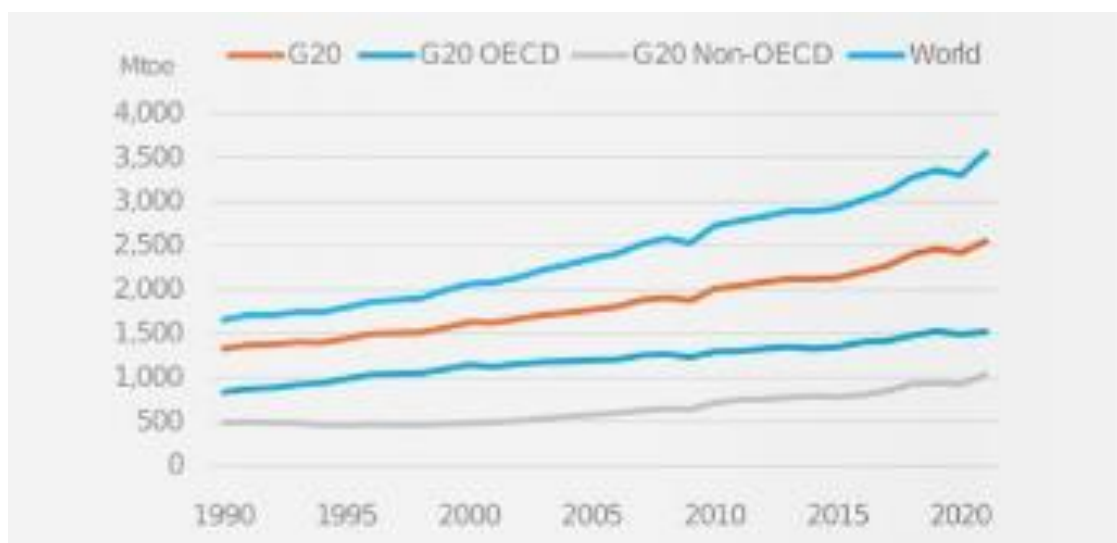


Figura 11. Consumo histórico del GN [9].

El Figura 11, muestra la evolución creciente de la demanda de Gas de los países que conforman el G20.

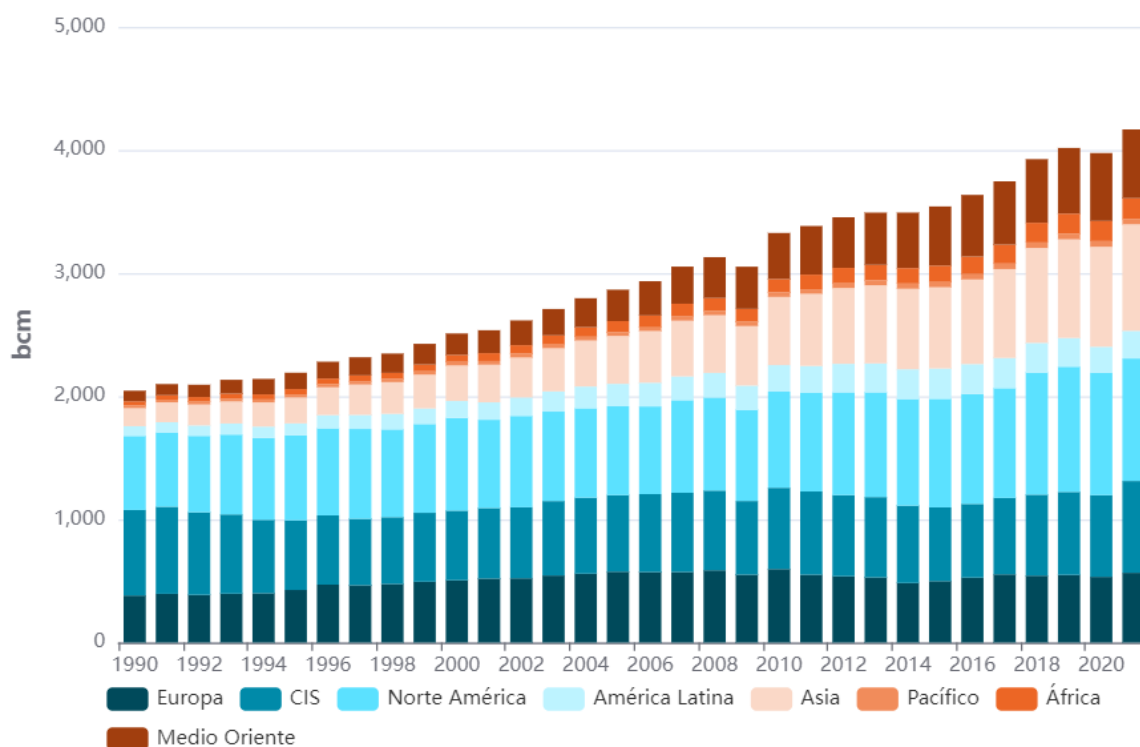


Figura 12. Tendencias energéticas mundiales en los últimos 30 años [9].

La creciente demanda de GN se debe principalmente a su mayor uso en la generación de electricidad y en la industria, así como a su menor impacto ambiental en comparación con otros combustibles fósiles como el petróleo y el carbón. Sin embargo, es importante destacar que también existen preocupaciones en torno al impacto ambiental del GN, especialmente en lo que se refiere a las emisiones de metano durante su extracción y transporte.

1.4.- Ventajas del GN frente a otras fuentes de energía

El GN tiene varias ventajas en comparación con otras fuentes de energía, entre las cuales se destacan las siguientes:

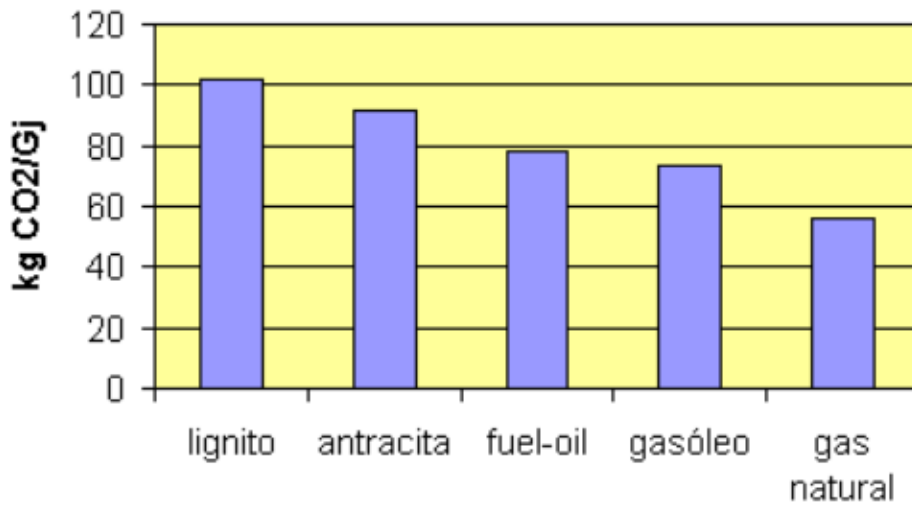


Figura 13. Emisión de CO₂ en la combustión [10].

A.- Menores emisiones de gases de efecto invernadero: El GN produce menos emisiones de gases de efecto invernadero que otros combustibles fósiles como el petróleo (entre -25% y -30 %) y el carbón (entre -40% y -50 %), y también el GN genera dos veces menos emisiones de NOx que el carbón y 2,5 veces menos que el fuel-oil, lo que lo convierte en una opción más limpia desde el punto de vista ambiental.

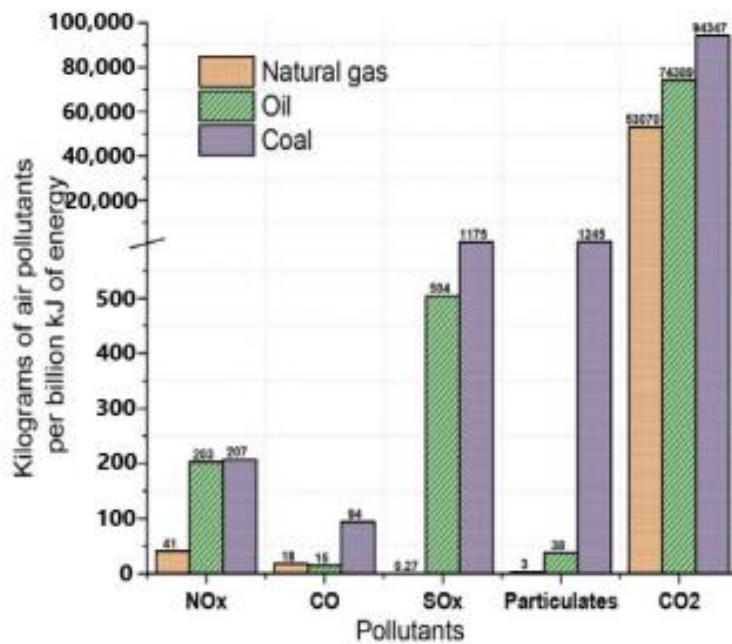


Figura 14. Contaminación atmosférica de GN, carbón y petróleo [11].

B.- Mayor eficiencia energética: El GN es una fuente de energía muy eficiente, ya que produce más energía por unidad de combustible que otros combustibles fósiles.

C.- Versatilidad: El GN se puede utilizar para una amplia variedad de aplicaciones, como la generación de electricidad, la calefacción y el enfriamiento de edificios, la cocina y la producción de combustibles líquidos.

D.- Menores costos: El GN es generalmente más barato que otros combustibles fósiles como el petróleo y el carbón, lo que lo hace más asequible para los consumidores.

E.- Mayor seguridad: El GN es más seguro que otros combustibles fósiles, ya que es más ligero que el aire y se disipa rápidamente en caso de fugas. Además, las instalaciones de GN son rigurosamente reguladas y monitoreadas para garantizar su seguridad

1.5.- Utilización de cada energía en el mundo

La energía utilizada en el mundo se compone de varias fuentes, incluyendo combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón), energía nuclear, hidroeléctrica, eólica, solar y biomasa. El porcentaje de cada fuente de energía utilizada actualmente en el mundo varía según el país y la región.

Según el informe de la Agencia Internacional de Energía (AIE) sobre el consumo mundial de energía en 2020, la distribución mundial de la energía fue la siguiente:

Combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón): 81.2%

Energía renovable: 19.8%

Dentro de la energía renovable, la distribución fue la siguiente:

Hidroeléctrica: 6.4%

Eólica: 2.7%

Solar: 2.2%

Biomasa: 6.9%

Otras renovables: 1.6%

Es importante destacar que estos porcentajes pueden variar de año en año y de acuerdo con la evolución de las políticas energéticas y los avances tecnológicos. Además, hay países y regiones que dependen más de ciertas fuentes de energía que otras. Por ejemplo, algunos países dependen en gran medida del petróleo y GN, mientras que otros pueden depender más de la energía hidroeléctrica o solar.

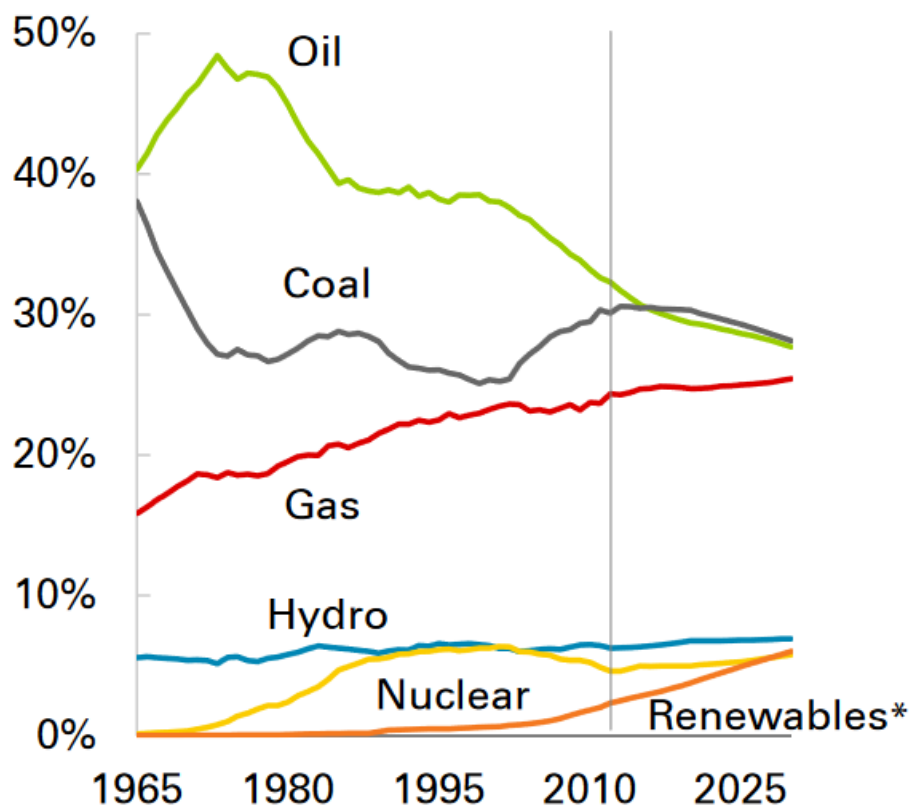


Figura 15. Predicción del crecimiento de fuentes de energía [12].

En la Figura 15, se muestra la evolución de las distintas fuentes de energía desde 1965 así como su previsión hasta 2035. En ella se observa que mientras el petróleo, el carbón y en menor medida la nuclear están disminuyendo, el gas, el Hidrógeno y las renovables aumentan y que la previsión es que lo sigan haciendo en el futuro.

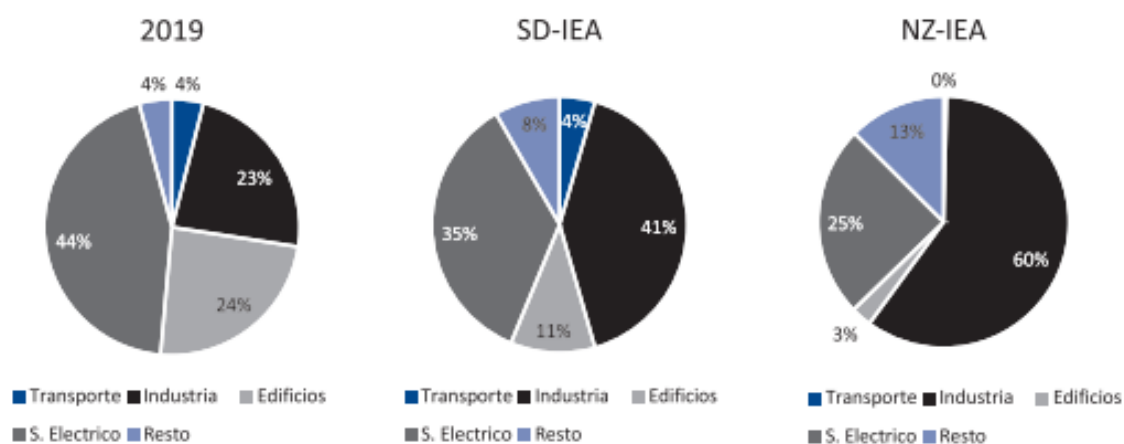


Figura 16. Consumo de gas por sectores en 2019 frente a dos hipotéticos futuros de 2050 [13].

Y si analizamos por sectores, Figura 16, vemos que actualmente los sectores que más consumen GN son, el suministro eléctrico 44%, edificios (calefacción, agua caliente, etc) 24 % y la industria 23 % y la previsión es que en el futuro el sector que más GN consuma sea la industria (entre el 41-60 %), seguido de los edificios (entre un 25-35 %)

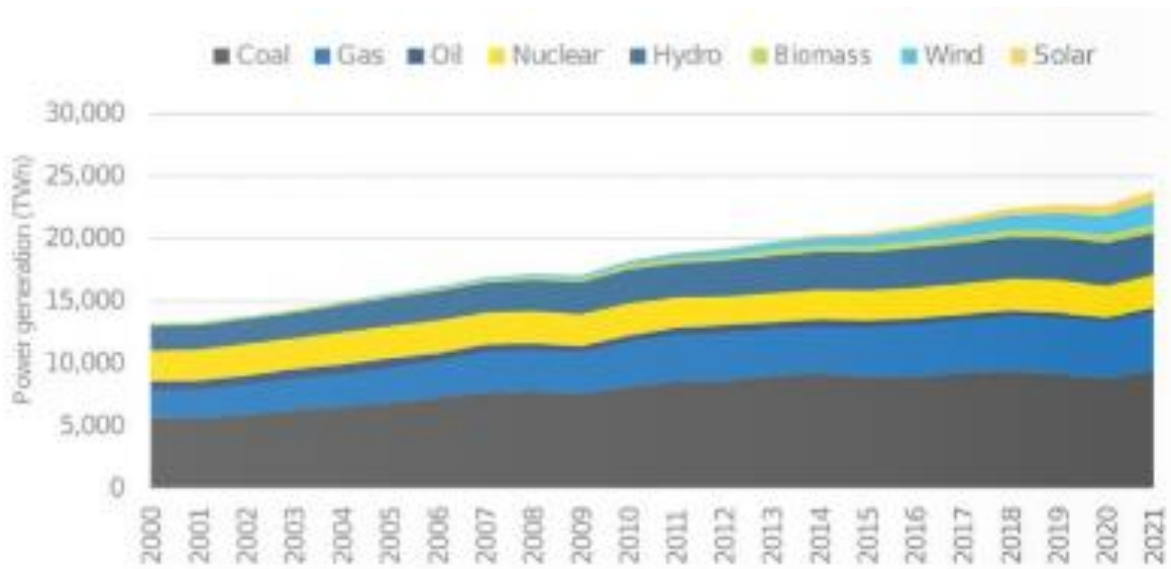


Figura 17. Tendencias energéticas en los países del G20 en los últimos 20 años [8].

En la Figura 17, se muestra la evolución del consumo de las diferentes fuentes de energía de los países del G20 desde el año 2000 hasta el 2021, en donde se observa como el consumo de gas natural ha ido aumentando durante los últimos 20 años.

2.- Aspectos generales del GN licuado

El Gas Natural Licuado (GNL) es una forma de GN que ha sido enfriada a una temperatura muy baja y comprimida para su transporte y almacenamiento. El GNL se ha convertido en una alternativa al GN en estado gaseoso, ya que ocupa menos espacio y es más fácil de transportar.

Las importantes reservas de GN que existen en nuestro planeta están a veces situadas en zonas alejadas que carecen de demanda local y donde, dada su lejanía, el transporte del GN a través de gasoductos no es rentable bajo ciertas circunstancias, como largas distancias, cruce de mares u océanos, topografía desfavorable, incertidumbres geopolíticas. Los avances tecnológicos de los últimos años han hecho técnica y económicamente viable el transporte del GN procedente de estas fuentes mediante buques metaneros (Figura 18) en fase líquida, enfriado hasta unos -160°C [14]. El gas transportado en fase líquida se conoce como gas natural licuado (GNL). La licuefacción reduce el volumen del gas aproximadamente 600 veces.



Figura 18. Transporte por barco de GNL [14].

2.1.- Situación actual y perspectivas del GNL a nivel España y mundial

2.1.1.-Situación actual del GNL a nivel España:

España es uno de los mayores importadores de GNL en Europa, junto con países como Italia, Francia y Reino Unido.

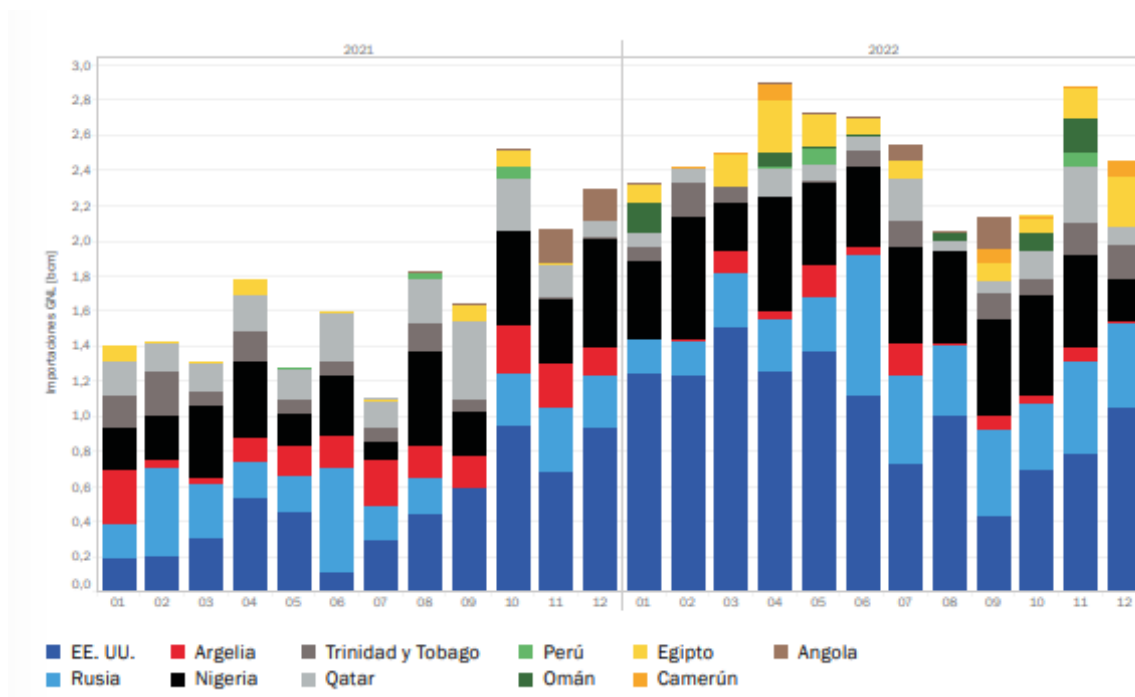


Figura 19. Importaciones de GNL a España [14].

Como muestra el Figura 19, actualmente los principales países de los que importamos el GNL son EEUU, con un aumento muy significativo a partir de la guerra en Ucrania, ya que importó 12,48 bcm, en 2022 (más del doble que en 2021) [14], Rusia, Nigeria, Qatar, Trinidad y Tobago, Omán, Egipto, Angola, Argelia, Camerún y Perú.

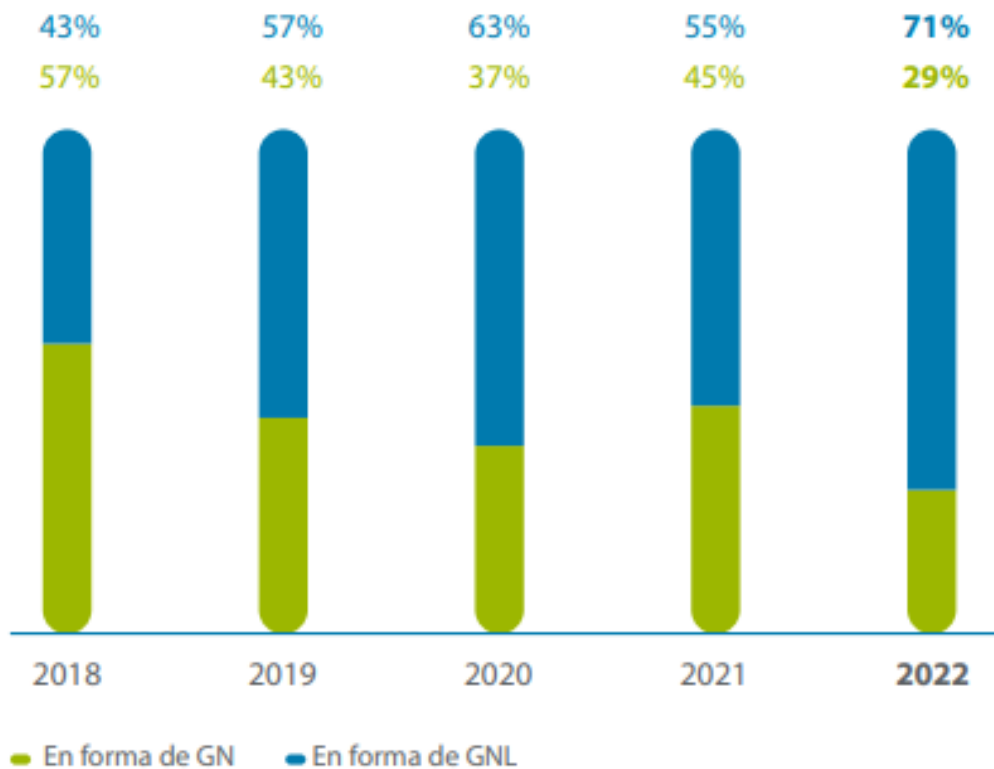


Figura 20. Evolución de los aprovisionamientos [15].

Como se puede ver en el Figura 20, en España por cuarto año consecutivo, las importaciones de GNL han superado a las de GN. y con una tendencia al alza, de ahí el aumento del interés y de la importancia que tiene toda optimización sobre cualquier etapa del GNL [15].

El puerto de Barcelona es el principal punto de entrada de GNL en España, seguido por los puertos de Huelva, Cartagena y Bilbao.



Figura 21. Instalaciones de la red básica del sistema gasista español [7].

El GNL se utiliza principalmente en la generación de electricidad, seguido por la industria y el transporte.

Se espera que la demanda de GNL en España continúe creciendo en los próximos años, impulsada por la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y el aumento de la demanda de energía.

España se ha convertido en un hub de GNL en Europa, con la construcción de nuevas infraestructuras de importación y exportación de GNL, como la terminal de GNL de El Musel en Asturias y la ampliación de la terminal de GNL de Barcelona.

PLANTA DE REGASIFICACIÓN	Capacidad máxima vaporización (Nm ³ /h)	Almacenamiento GNL		Capacidad carga cisternas	Atraques	
		Nº tanques	m ³ GNL	GWh/día	Nº tanques	m ³ GNL
Barcelona	1.950.000	6	760.000	15	2	266.000
Huelva	1.350.000	5	619.500	15	1	175.000
Cartagena	1.350.000	5	587.000	15	2	266.000
Bilbao	800.000	3	450.000	5	1	270.000
Sagunto	1.000.000	4	600.000	11	1	266.000
Mugardos	412.800	2	300.000	11	1	266.000
Total	6.862.800	25	3.316.500	71	8	Hasta 270.000

Figura 22. Características técnicas de las plantas de regasificación [16].

La transición energética y la descarbonización de la economía española son dos factores clave que podrían influir en el desarrollo del mercado del GNL en España.

2.1.2.-Situación actual del GNL a nivel mundial:

El GNL es un mercado global en constante crecimiento, los principales exportadores de GNL en el mundo son Catar, Australia, Estados Unidos, Rusia y Malasia. El GNL se utiliza en diversos sectores, incluyendo la generación de electricidad, la industria y el transporte.

La demanda de GNL se ha visto afectada por la pandemia de COVID-19, la guerra en Ucrania y la desaceleración económica global. Se espera que la demanda de GNL continúe creciendo en los próximos años, impulsada por el aumento de la demanda de energía y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

El GNL se está convirtiendo en un combustible clave para la descarbonización del transporte marítimo y el sector industrial. Los avances en tecnologías de producción, almacenamiento y transporte de GNL podrían impulsar el desarrollo del mercado mundial de GNL en los próximos años.

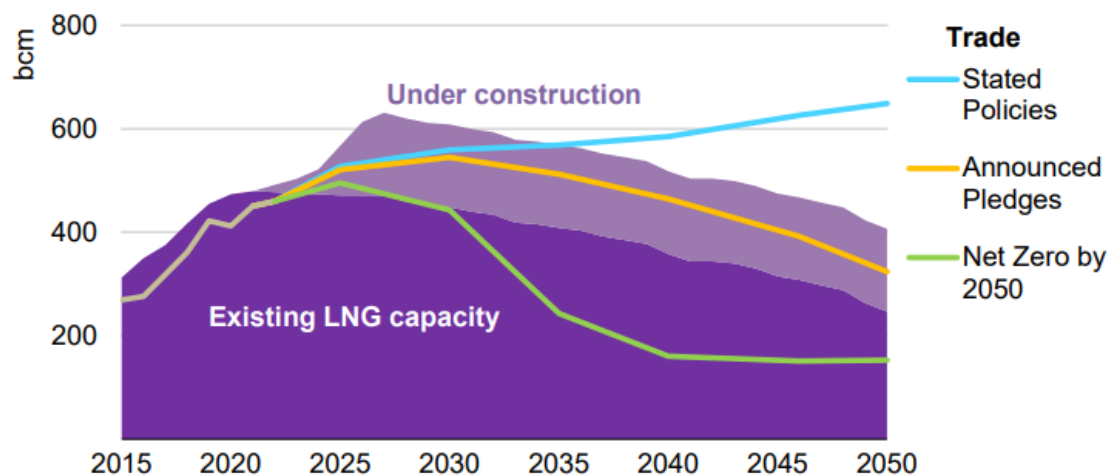


Figura 23. El comercio de GNL comparando la capacidad existente con la se construirá, de 2015 a 2050 [17].

El Escenario de Emisiones Netas Cero para 2050 (NZE, línea verde en la Figura 23)) es normativo, ya que está diseñado para lograr resultados específicos: una trayectoria de emisiones consistente con mantener el aumento de temperatura en 2100 por debajo de 1,5°C (con un 50% de probabilidad), acceso universal a modernos servicios de energía y mejoras importantes en la calidad del aire, y muestra un camino para alcanzarlo. El Escenario de Compromisos Anunciados (APS, línea amarilla en la Figura 23)) y el Escenario de Políticas Declaradas (STEPS, línea azul en la Figura 23)) [17] son exploratorios, en el sentido de que definen un conjunto de condiciones iniciales, como políticas y objetivos, y luego ven a dónde conducen en función de las representaciones modelo de los sistemas de energía, que incluyen la dinámica del mercado y el progreso tecnológico.

2.2.- Descripción de la licuefacción del GN

La licuefacción del GN es un proceso mediante el cual se convierte el GN, que es un gas a temperatura ambiente y presión atmosférica, en un líquido a una temperatura extremadamente baja y alta presión. El gas natural licuado (GNL) ocupa un volumen 600 veces menor que el GN en su estado gaseoso, lo que lo hace más fácil de almacenar y transportar.

La licuefacción del GN permite el transporte de grandes cantidades de GN a largas distancias y en regiones donde no hay infraestructura de gasoductos. Además, el gas natural licuado puede ser utilizado como combustible para el transporte, la generación de energía eléctrica y otros usos industriales y doméstico.

En función del refrigerante existen múltiples procesos industriales, siendo los más destacados los siguientes:

- Proceso de mezcla refrigerante preenfriado con propano (APCI C3-MR)
- Proceso de cascada Conocco-Phillips optimizado (COP)
- Proceso PRICO (Black & Veatch Pritchard)
- Proceso Statoil/Linde en cascada de fluido mezclado (MFCP)
- Proceso Shell de doble refrigerante mezclado (DMR)
- Proceso Liquefin de IFP/Axens

2.3.- Etapas del proceso

2.3.1.- Eliminación de impurezas

La eliminación de impurezas en el proceso de licuefacción del GN es un paso crucial para producir gas natural licuado (GNL) de alta calidad. Por lo que el gas natural crudo se somete a un proceso de purificación para eliminar impurezas como el dióxido de carbono, el agua, el nitrógeno y otros contaminantes.

Eliminación de agua: El GN contiene humedad en forma de agua. La presencia de agua puede causar problemas durante la licuefacción, como la formación de hielo en los equipos. Por lo tanto, se utilizan deshidratadores para eliminar el agua mediante procesos de absorción o adsorción.

Eliminación de dióxido de carbono (CO₂): El dióxido de carbono es una impureza común en el GN y debe ser eliminado para producir GNL de alta calidad. Se pueden

utilizar procesos de absorción química, como el uso de solventes como la monoetanolamina (MEA) o la dietanolamina (DEA), para separar el CO₂ del GN.

Eliminación de azufre: El GN a menudo contiene compuestos de azufre, como el sulfuro de hidrógeno (H₂S) y los mercaptanos, que son indeseables debido a su olor desagradable y su corrosividad. La eliminación del azufre se puede lograr mediante procesos de absorción con solventes específicos, como soluciones de aminas, o mediante el uso de tecnologías de adsorción.

Reducción del nitrógeno a menos del 1 %. El nitrógeno es uno de los componentes no deseados en el GN, ya que reduce el poder calorífico del gas y puede causar problemas en los equipos y procesos de GN. Por lo tanto, el tratamiento de calidad del GN para obtener menos del 1% en nitrógeno es un proceso importante en la producción y distribución de GN.

El proceso para reducir la cantidad de nitrógeno en el GN implica varios pasos, entre los que se incluyen:

- **Deshidratación:** en esta etapa se elimina la humedad del GN mediante el uso de deshidratadores. La presencia de agua en el GN puede causar problemas de corrosión y formación de hidratos
- **Eliminación de impurezas:** se eliminan otras impurezas del GN, como sulfuros y dióxido de carbono (CO₂), mediante la absorción o el proceso de adsorción con materiales específicos.
- **Separación de nitrógeno:** se utiliza el proceso de adsorción para separar el nitrógeno del GN. Este proceso se lleva a cabo en torres de adsorción que contienen materiales adsorbentes específicos, como zeolitas. El nitrógeno se adhiere a estos materiales y se separa del GN.
- **Regeneración:** una vez que los materiales adsorbentes se han saturado con nitrógeno, se regeneran mediante la eliminación del nitrógeno. Este proceso se lleva a cabo calentando los materiales adsorbentes, lo que libera el nitrógeno.

- Purificación final: en esta etapa final, se eliminan cualquier impureza residual y se ajusta la composición del GN para que cumpla con los requisitos de calidad específicos.

Eliminación de otros contaminantes: Además de los componentes mencionados anteriormente, el GN puede contener otros contaminantes como el monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COV) y trazas de metales, en particular de mercurio si los cambiadores criogénicos que se van a utilizar están contruidos en aluminio, al que afecta química y mecánicamente. Estos contaminantes también se eliminan mediante procesos de absorción, adsorción u otros tratamientos químicos específicos.

2.3.2.- Enfriamiento

El GN purificado se enfría a una temperatura de alrededor de -162°C (-260°F), pues esa es la temperatura de burbuja a presión atmosférica, en un intercambiador de calor que utiliza un refrigerante para extraer el calor del GN.

Expansión adiabática: Para alcanzar la temperatura citada se enfría previamente el GN, y se expande adiabáticamente para conseguir la etapa final del enfriamiento necesario. Esto significa que se deja que el gas se expanda sin que se produzca una transferencia de calor significativa hacia o desde el entorno. Esta expansión adiabática hace que la temperatura del gas disminuya aún más, acercándolo a la temperatura de licuefacción. La expansión del gas ocurre en el tanque flash, que tiene un mayor volumen, como se hablará posteriormente. Se da un cambio de fases al pasar por la válvula, que se puede situar justo en la entrada o dentro del tanque flash.

La etapa final es el proceso de flash, en el cual se somete al gas a una reducción rápida de presión, lo que provoca una expansión adiabática y una evaporación

parcial del líquido. En este momento, una parte del GN líquido se vaporiza, lo que produce una disminución de la temperatura del líquido restante. Se realiza la separación mecánica del gas que sale por cabezas, y del líquido que sale por colas. El gas vaporizado se utiliza como combustible en algunas fases del proceso de licuefacción o se reinyecta en el yacimiento de GN.

2.4.- Tecnologías de licuefacción de GN

A menudo, en la selección del proceso de licuefacción del GN influye el consumo de energía por tonelada de GNL producido. Este es un parámetro importante puesto que los compresores de refrigerante en el proceso de licuefacción de gas son los más destacados en coste y consumo de energía. Una forma de comparar los diferentes sistemas de licuefacción de GN es teniendo en cuenta [18]:

- Potencia del compresor.
- Requisito del área de superficie del intercambiador de calor.
- Las temperaturas se aproximan entre la curva de enfriamiento del gas y calentamiento del refrigerante en el intercambiador de calor.

Esta última consideración es un punto de referencia en dicha comparación. Sin embargo, puede ser engañoso si solo se tiene en cuenta el rendimiento energético de un sistema y no el coste de capital y operativo del ciclo.

Las primeras plantas de licuefacción natural y algunas en la actualidad se basan en los clásicos procesos en cascada unidades de refrigeración por compresión-expansión que trabajan con compuestos puros como metano, etileno y propano como refrigerante, encadenados a diferentes intervalos de temperatura. Hoy en día, la mayoría de las plantas de licuefacción existentes funcionan con al menos un ciclo de refrigerante mezclado. Pero, en estos últimos años, se han construido otros

procesos como el sistema en cascada con refrigerantes mezclados y procesos con ciclos dobles con refrigerantes mezclados. Por otro lado, los ciclos basados en expansores que funcionan con nitrógeno como fluido de trabajo se usan en una serie de plantas de licuefacción de gas a pequeña escala [18], y en instalaciones a bordo de navíos, por su simplicidad y seguridad implícita.

Hay que tener en cuenta que dichas tecnologías están evolucionando continuamente y hay muchas versiones derivadas de esta.

3.- Aspectos generales de la recirculación del GN licuado

La licuefacción de GN con recirculación de End flash gas (EFG) es una técnica utilizada para mejorar la eficiencia energética en la planta de licuefacción. Se hace con la intención de evitar el enfriamiento que acompaña a la expansión adiabática de un gas. Este principio termodinámico se denomina efecto Joule. Así se consigue una rápida fase de enfriamiento en el mismo cambio de presión. Esto sucede cuando la mezcla que se expande es más rica en volátiles, como el nitrógeno, y por eso se recirculan las cabezas, más ricas en ligeros.

En el proceso de licuefacción de GN, el gas se enfría a temperaturas extremadamente bajas para convertirlo en estado líquido. Después se hace una expansión adiabática controlada en un flash. Durante este proceso, una parte del GN se vaporiza y se convierte en lo que se conoce como End Flash Gas (EFG). Por otro lado, el resto de la corriente permanece en estado líquido, aun estando a presión atmosférica. Este es el producto de alto valor en el mercado, con lo que el objetivo será mejorar el proceso con la intención o de obtener más producto o con menor gasto energético y a su vez menor costes de producción.

En lugar de liberar el gas EFG al ambiente, cosa que puede ser perjudicial para el medio ambiente, se puede recircular. Esto se hace para un aprovechamiento posterior reduciendo la energía consumida por los equipos incluidos en el sistema, o quemándolo el EFG para conseguir la energía liberada. De esta forma, se invierte esa energía en los equipos utilizados en el proceso, para maximizar la eficiencia energética.

Este trabajo estudia el tratamiento de la corriente EFG que sale del flash. El gas generado se comprime nuevamente, se recircula y se reintroduce en la corriente principal de GN antes de entrar en el proceso de licuefacción. Al recircular el EFG, se aprovecha su energía térmica y se reduce la carga térmica requerida para enfriar el

GN. Además, se da una variación de composición en la alimentación, enriqueciéndolo en compuestos ligeros, especialmente nitrógeno, que tiene un impacto en el gasto de energía del intercambiador. Esto permite ahorrar energía y mejorar la eficiencia del proceso de licuefacción.

La recirculación del flash gas en el proceso puede lograrse mediante la instalación de compresores adicionales y sistemas de enfriamiento adecuados para mantener el gas en las condiciones requeridas. Este enfoque puede reducir los costes de operación y aumentar la eficiencia global de la planta de licuefacción de GN.

4.- Análisis de la influencia de la recirculación

4.1 Variación de nitrógeno en la alimentación

Se ha realizado el estudio de licuefacción del GN sin recirculación. Para ello, se ha optado por hacer una simulación en el programa ASPEN PLUS. En dicho programa se ha representado el sistema que empieza con la alimentación del GN procedente del pozo a alta presión (40bar). Este se introduce en un intercambiador de calor con el objetivo de enfriarlo a temperatura muy baja. Después se hace pasar por una válvula adiabática isoentálpica para bajar la alta presión a presión atmosférica. Al entrar al flash, esta corriente se escinde en dos, una líquida con los componentes valiosos, y otra gaseosa (EFG) con mayor contenido en nitrógeno, aunque la composición en metano también será elevada, por ser este un compuesto muy volátil. Recuérdese que el flujo de la corriente EFG será mucho menor que el de la corriente líquida.

Como ya se ha expresado antes, es importante que la corriente de licuefacción de GN contenga un porcentaje menor del 1% en nitrógeno. Por lo que la condición que se ha impuesto en el sistema es de que la fracción molar a la salida líquida del flash sea de 0,0096 [19]. Esto se ha planteado con un SOLVER implementado en el simulador, indicando que se puede variar la cantidad de calor retirado en el intercambiador.

$$C8 = GNL + EFG \quad Ec (1)$$

$$C8 * X_{N_2} = GNL * X_{N_2} + EFG * X_{N_2} \quad Ec (2)$$

$$C8 * X_{Metano} = GNL * X_{Metano} + EFG * X_{Metano} \quad Ec (3)$$

$$C8 * X_{Etano} = GNL * X_{Etano} + EFG * X_{Etano} \quad Ec (4)$$

$$C8 * X_{n-Butano} = GNL * X_{n-Butano} + EFG * X_{n-Butano} \quad Ec (5)$$

$$C8 * X_{i-Butano} = GNL * X_{i-Butano} + EFG * X_{i-Butano} \quad Ec (6)$$

Estos cálculos son balances de materia a tres equipos con una corriente multicomponente. El balance de materia al flash es el conjunto de ecuaciones recopiladas en las ecuaciones 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

La válvula isoentálpica se resolvería con el balance de materia de la ecuación 7 y el primer principio de la termodinámica, que aparece en la ecuación 8. Sabiendo que el proceso es estacionario, en esta última ecuación 8, el término de la velocidad de la variación de la energía interna respecto del tiempo es nulo.

$$C7 = C8 \quad Ec (7)$$

$$Q - W = \frac{du_{VC}}{dt} + \sum m_s \left(hs + \frac{c_s^2}{2} + gz_s \right) + \sum m_e \left(he + \frac{c_e^2}{2} + gz_e \right) \quad Ec (8)$$

Y para el intercambiador se realizaría con los balances de materia y energía planteados en las ecuaciones 9, 10, 11, 12 y 13. Sabiendo que el intercambiador no desprende calor al ambiente, que no se realiza trabajo útil dentro del intercambiador, puesto que no hay ninguna pieza móvil en el interior, y que se desprecian las energías cinéticas y potenciales frente al cambio de la entalpia, la ecuación se simplifica como queda descrita. Todos estos cálculos los realiza el programa ASPEN PLUS, teniendo en cuenta que se debe cumplir la condición de que, en la salida del flash líquida, la corriente GNL debe contener una cantidad de nitrógeno menor del 1%.

$$FGN = C7 \quad Ec (9)$$

$$Q + W = \Delta E_C + \Delta E_P + \Delta H \quad Ec (10)$$

$$Q_{Retirado} = \Delta H \quad Ec (11)$$

$$Q_{Retirado} = FGN * h_{FGN} - C7 * h_7 \quad Ec (12)$$

$$Q_{Retirado} = FGN * (h_{FGN} - h_7) \quad Ec (13)$$

Esta simulación se ha realizado para diferentes corrientes de entrada de GN, variando el porcentaje de nitrógeno contenido. De esta manera se traza una recta de calibrado del sistema en función del porcentaje de nitrógeno a la entrada. Así se puede ver el comportamiento del sistema ante un tipo de perturbación. La Figura 24 muestra el planteamiento del sistema para el caso inicial, en el que la corriente está formada como se indica en el [19], con un 4% de nitrógeno. El resto de los compuestos tienen la siguiente proporción molar: metano 87,5%; etano 5,5%; propano 2,1%; n-butano 0,5%; iso-butano 0,3%; iso-pentano 0,1%.

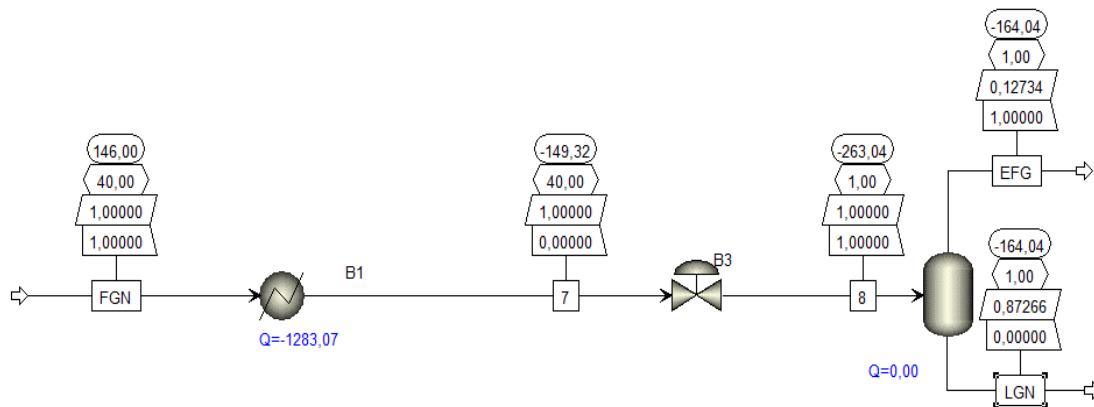


Figura 24. Simulación del sistema simple con 4%N₂ entrante.

Como se ve en la Figura 24, se requiere enfriar la corriente hasta una temperatura de 109,15 kelvin para conseguir que el porcentaje de nitrógeno a la salida sea menor

del 1%. Esto hace que se necesite una energía de 1281,94 calorías/segundo para el sistema simple sin recirculación con los datos iniciales. De esta simulación se ha recogido toda la información, como las temperaturas de las corrientes, el calor retirado en el intercambiador y el flujo y composición de las corrientes de salida del flash.

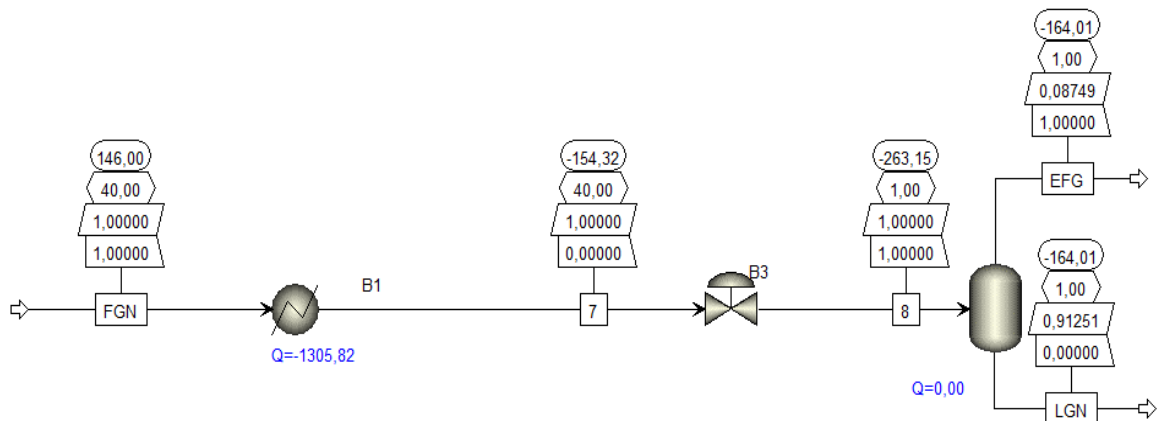


Figura 25. Simulación del sistema simple con 3%N₂ entrante.

La corriente de entrada de GN suele tener diferente composición según el tipo del pozo del que se extrae. Por esto se ha realizado la misma simulación variando el porcentaje de nitrógeno, en concreto se ha simulado con 3% de nitrógeno en la Figura 25, y con un 2% de nitrógeno en la Figura 26. El resto de los compuestos se han normalizado de forma alícuota hasta la suma de fracciones molares igual a la unidad, según se iba planteando la corriente de alimentación con menor cantidad de nitrógeno. Toda la información se ha recogido en la Tabla 2.

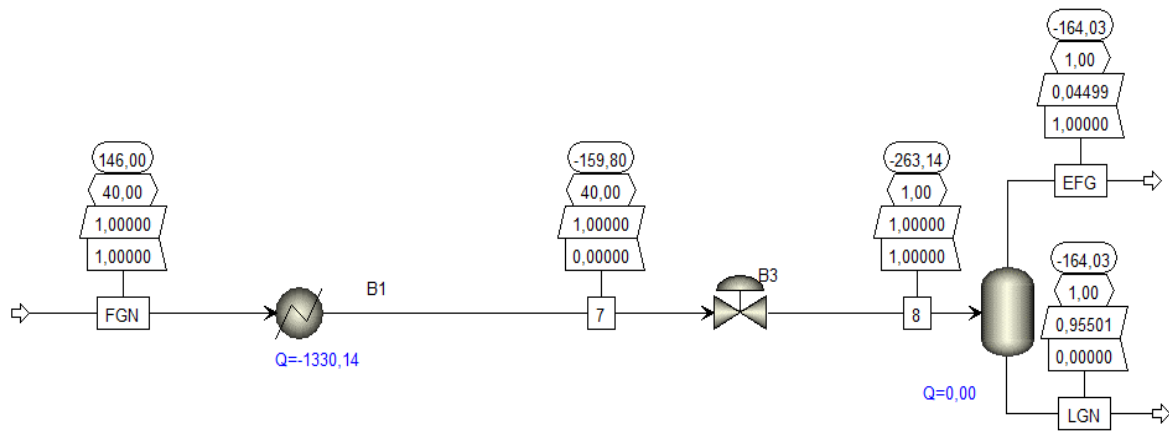


Figura 26. Simulación del sistema simple con 2%N₂ entrante.

Tabla 2. Variación de flujos y temperaturas según el %N₂ entrante.

%N ₂ entrada	Q inter (kW)	T ^a (K) C7	T ^a (K) C8	GNL (Kmol/h)	EFG (Kmol/h)
4	3,062	124,13	109,15	0,8727	0,1273
3	3,119	118,83	109,15	0,9125	0,0875
2	3,177	113,35	109,15	0,9564	0,0436

Con estos tres casos, se observa que al imponer la condición de que el porcentaje de nitrógeno sea menor del 1% a la salida líquida del flash, hace que las condiciones del flash sean siempre las mismas. Es decir, que la temperatura a la que llega al flash siempre será 109,15 Kelvin y 1 bar de presión.

Mirando lo que ocurre en la válvula a la salida siempre es un valor constante de 109,15 K de temperatura. Aunque el salto de temperaturas entre la entrada y la salida vaya aumentando, la temperatura de salida permanece constante. Esto quiere decir que cuanto mayor cantidad de nitrógeno haya en la corriente mezcla, el salto de temperaturas en la válvula será también mayor, haciendo que se requiera enfriar menos la corriente, puesto que igualmente va a alcanzar las mismas condiciones en el flash. Para conseguir esta temperatura, en el intercambiador se requiere de menor esfuerzo, es decir, menor temperatura del refrigerante para alcanzar con las condiciones implantadas en el caso de tener mayor proporción de nitrógeno. Sin

embargo, cuanto menor porcentaje de nitrógeno a la entrada, a pesar de haber menor cantidad de nitrógeno que hay que retirar de la corriente de producto, el intercambiador requiere de mayor energía, que se traduce en mayor gasto en el circuito de refrigerante. Por lo que cuesta más separar el nitrógeno de la corriente si hay poco porcentaje de este. Esto se puede explicar de forma simplificada como que la temperatura de rocío del nitrógeno (238 K) es mayor a la del componente de mayor porcentaje, el metano con 216 K. Cuanto mayor cantidad de nitrógeno haya en la corriente, será más fácil enfriar dicha corriente.

Realizando un estudio en la composición del flujo de licuefacción del gas que sale por colas en el flash se puede observar la Figura 27 que representa la cantidad de cada compuesto según los tres casos realizados con diferente porcentaje de nitrógeno en la alimentación. Lo primero que se observa es que prácticamente todos los compuestos permanecen constantes en su concentración. Solo se aprecia un leve descenso en el porcentaje de metano, el componente mayoritario, y un ascenso leve de etano proporcionalmente. Dando a entender que a mayor cantidad de nitrógeno hay en la alimentación, mayor cantidad de metano se escapará por la cabeza del flash en forma gaseosa. Esto se puede comprobar estudiando la relación de flujos a la salida del flash.

Tabla 3. Composición de la corriente GNL

%N2 entrada	Corriente 9 NGL						
	%N2	%Met	%Et	%Prop	%n But	%isobut	%i Pentano
4	0,0097	0,8930	0,0630	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
3	0,0096	0,8973	0,0603	0,0230	0,0055	0,0033	0,0010
2	0,0098	0,9014	0,0575	0,0220	0,0052	0,0031	0,0010

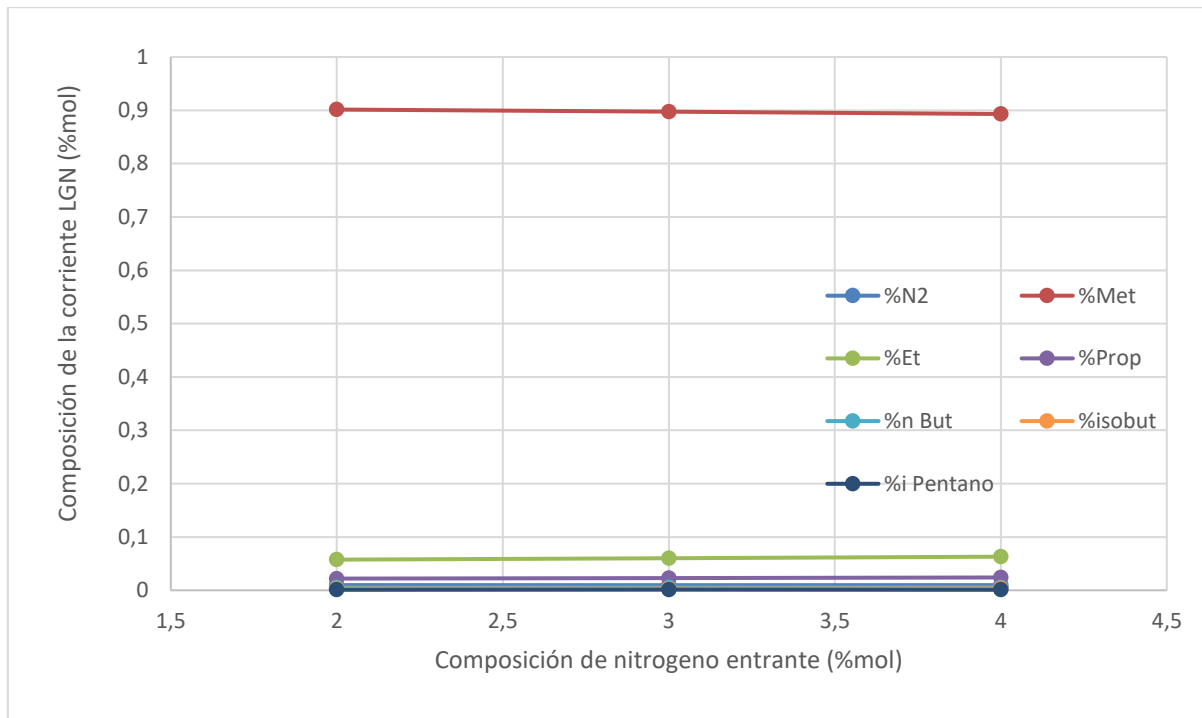


Figura 27. Composición en moles de los compuestos frente a la variación de N_2 .

Estudiando la evolución de la composición de la corriente gaseosa que sale por el flash, el EFG, que queda representado en la Figura 28. Se observa que el porcentaje molar de todos los compuestos permanece constante, cualquier variación es despreciable, y en el caso de los compuestos más pesados son prácticamente nulos. Lo que quiere decir que, si el porcentaje de nitrógeno es mayor a la entrada, mayor cantidad de nitrógeno saldrá por la corriente gaseosa, ya que se ha fijado el valor de nitrógeno que sale por la licuefacción, y en relación una proporción de metano mayor se irá con el sobrante de nitrógeno. Esto se puede constatar estudiando los flujos de ambas corrientes.

Tabla 4. Composición de la corriente EFG.

Corriente 10 EFG							
%N2 entrada	%N2	%Met	%Et	%Prop	%n But	%isobut	%i Pentano
4	0,2475	0,7516	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
3	0,2428	0,7563	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
2	0,2444	0,7547	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0008

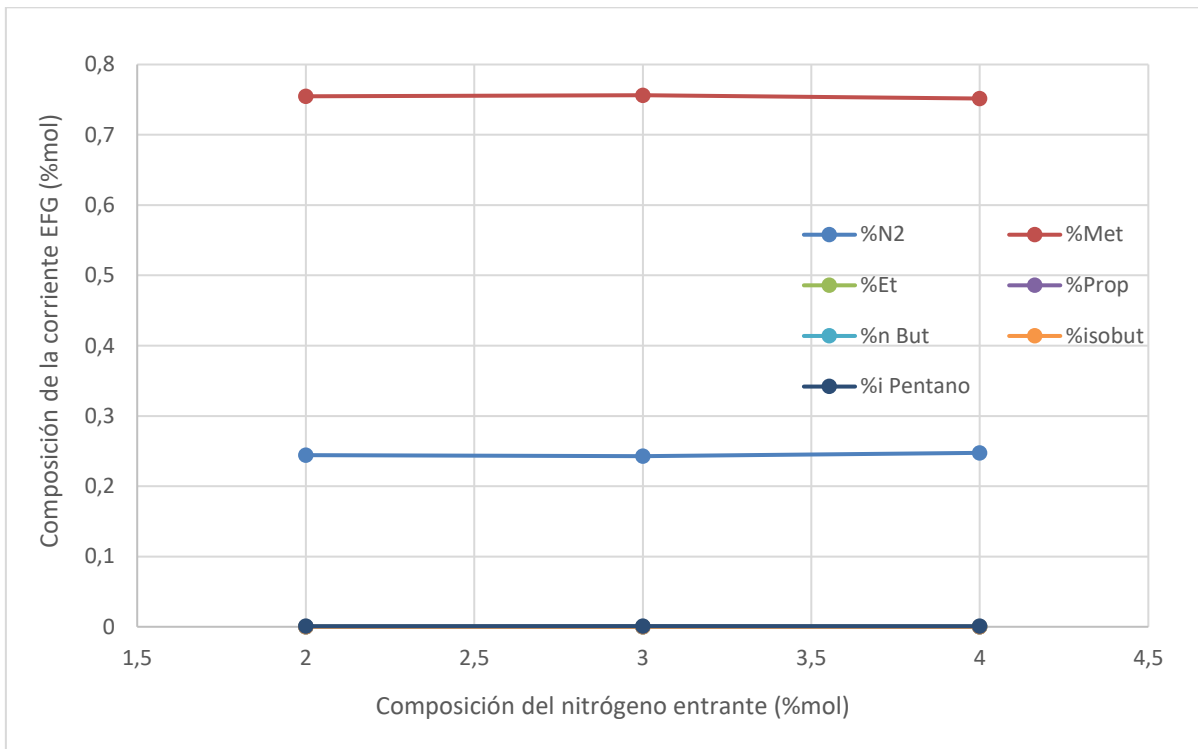


Figura 28. Composición de EFG según la composición de nitrógeno entrante.

Estudiando la cantidad de los flujos de las salidas de flash se ha representado la Figura 29, donde se ve los flujos de EFG y de GNL respecto a la cantidad de nitrógeno que hay en la alimentación. Se ve claramente que la corriente gaseosa de EFG aumenta según aumenta la cantidad de nitrógeno a la entrada, e inversamente proporcional el flujo de la corriente líquida de GNL disminuye según hay mayor presencia de nitrógeno en la entrada. Aquí se comprueba que efectivamente a mayor proporción de nitrógeno en la entrada mayor es la cantidad de metano que sale por cabezas del flash en la corriente gaseosa.

El interés del proceso es conseguir un mayor flujo de corriente de GNL, que es el producto final de valor del proceso. Sin embargo, este disminuye si en la alimentación se encuentra mayor cantidad de nitrógeno.

El porcentaje de nitrógeno no depende de los procesos anteriores de limpieza de contaminantes, si no del tipo de yacimiento, por lo que se debe trabajar acorde a lo que contenga en cada caso particular. Aquí se va a realizar el estudio para el caso de 4% de nitrógeno, que es el caso más alto de nitrógeno propuesto. Para recuperar ese metano que se escapa por la cabeza del flash se plantea una recirculación de dicha corriente al principio del proceso. Además, con la recirculación propuesta se consigue la reducción del consumo de la potencia consumida en el intercambiador, por consiguiente, hay un ahorro en el trabajo requerido en el compresor que hay en el sistema de refrigeración.

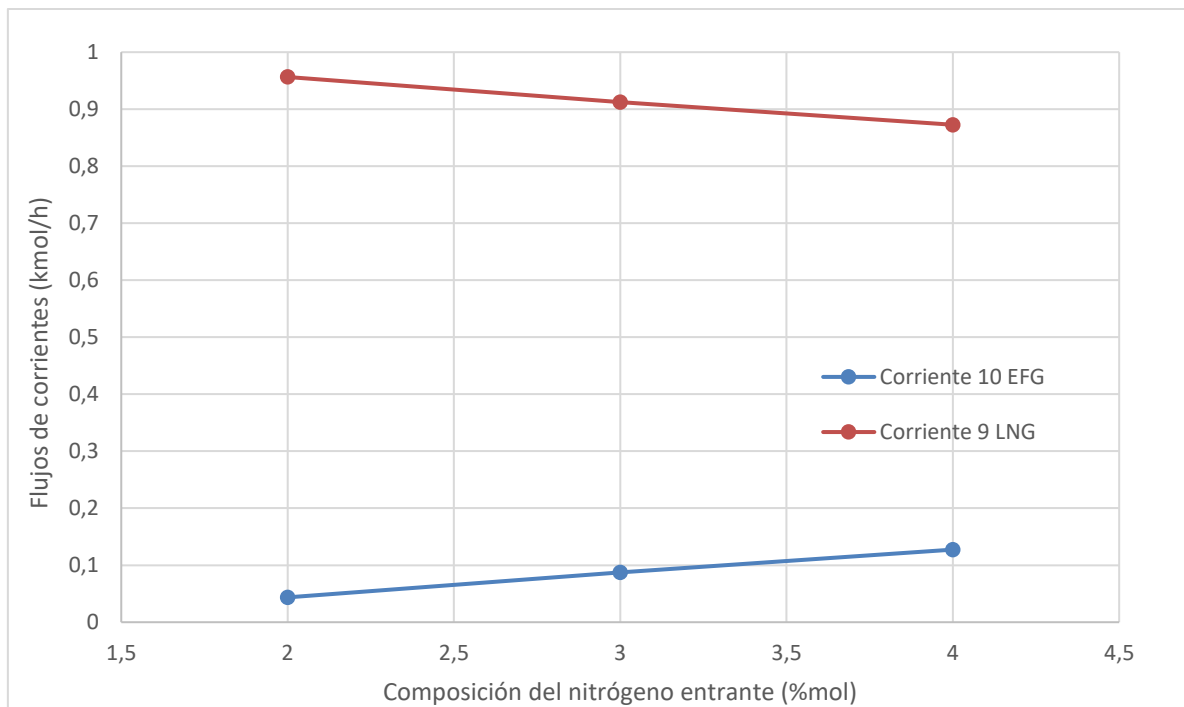


Figura 29. Evolución de los flujos según el nitrógeno entrante.

4.2 Recirculación

Ahora se ha añadido la recirculación del EFG en el sistema de simulación. Primero se divide la corriente EFG en dos corrientes de igual composición y en las mismas condiciones. Una corriente será la purga por donde sale el nitrógeno que se quiere quitar de la corriente de gas natural, y la otra corriente es la que se recircula al

principio del sistema, para mezclarse con la alimentación de GN. La recirculación está a presión atmosférica, pero la corriente con la que se mezcla, a alimentación de GN está a alta presión. No es interesante bajar la presión con la que se alimenta en el intercambiador, porque si no, no hay un salto de presión suficiente en el flash y de esta manera no se puede generar un cambio de fase deseable con el que poder separar el nitrógeno adecuadamente. Por lo que igualmente habría que subir la presión y cuesta menos recomprimir la recirculación antes de la mezcla que subir la presión de la corriente de la mezcla que es mayor. Por esta razón se coloca un compresor en la corriente de recirculación, subiendo de la presión atmosférica a 40 bares, para que esté a la misma presión que la alimentación de GN [20]. Esto se resuelve con los siguientes balances de materia, puestos en las ecuaciones 14, 15, 16, 17, 18 y 19. Además de los ya mencionados en el apartado anterior.

$$FGN = GNL + Purga \quad Ec (14)$$

$$FGN * X_{compuesto} = GNL * X_{compuesto} + Purga * X_{compuesto} \quad Ec (15)$$

$$FGN + CS7 = Mezcla \quad Ec (16)$$

$$FGN * X_{compuesto} + CS7 * X_{compuesto} = Mezcla * X_{compuesto} \quad Ec (17)$$

$$EFG = Recirculación + Purga \quad Ec (18)$$

$$EFG * X_{comp} = Recirculación * X_{comp} + Purga * X_{comp} \quad Ec (19)$$

Se procede a realizar diversas simulaciones en ASPEN PLUS, según el esquema que se muestra en la Figura 30. Sin embargo, este programa le cuesta hacer cálculos cíclicos cuando hay saltos grandes en la recirculación, por lo que se va a ir aumentando la corriente de recirculación a gradientes pequeños. Empezando por

una recirculación de cero, e ir aumentando cada 0,05 kmol/h se ha conseguido una Figura 30 de información recopilada, de las temperaturas en las corrientes, y de los flujos y composiciones de las corrientes de salida del flash.

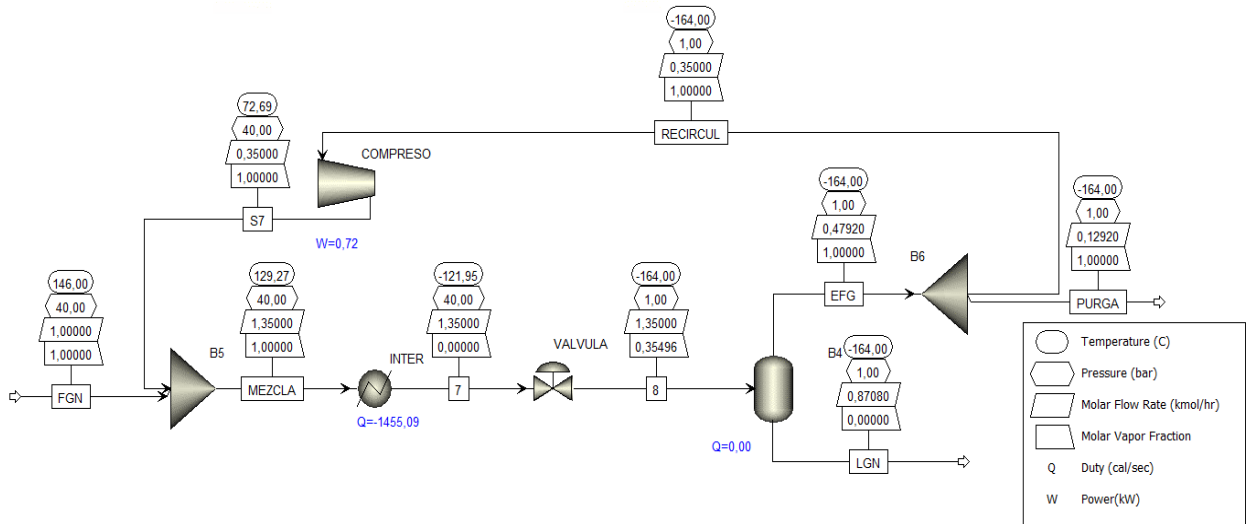


Figura 30. Simulación con recirculación.

Todos los datos obtenidos en las simulaciones están recogidos en las tablas 5, 6 y 7, que se adjuntan en el anexo de 7.2 Tablas. Lo primero que se aprecia en los datos es el valor constante de la temperatura en la corriente C8. Confirmando que como en el caso del sistema sin recirculación, para que la condición de que el porcentaje de nitrógeno sea menor del 1% a la salida de la licuefacción del gas natural, las condiciones iniciales en el flash deben ser iguales.

Lo siguiente que se observa en la Figura 31 de datos recopilados de la Tabla 5, es la temperatura de la corriente C7 después del intercambiado. Siendo la temperatura cada vez mayor, lo que implica que cuanto más cantidad sea recirculada, hace falta enfriar menos la corriente de entrada en el intercambiador. Y por tanto menos gasto de energía requiere el intercambiador, haciendo también menor el gasto del circuito de refrigeración. Esto es debido al aumento de nitrógeno en la corriente, que hace que cueste menos trabajo enfriar la corriente, y en el momento en el que pasa por la

válvula el salto de temperatura va a ser mayor, haciendo que no sea necesario enfriar a tan baja temperatura dicha corriente, como se vio en el caso del sistema sin recirculación.

El trabajo que realiza el compresor aumenta según el caudal que se hace pasar por él. Por otro lado, el intercambiador realiza cada vez mayor trabajo a pesar de que tiene que enfriar a menor temperatura que anteriormente, esto es porque cada vez tiene que enfriar un flujo mayor, lo que complica la labor de determinar si la recirculación es favorable o no.

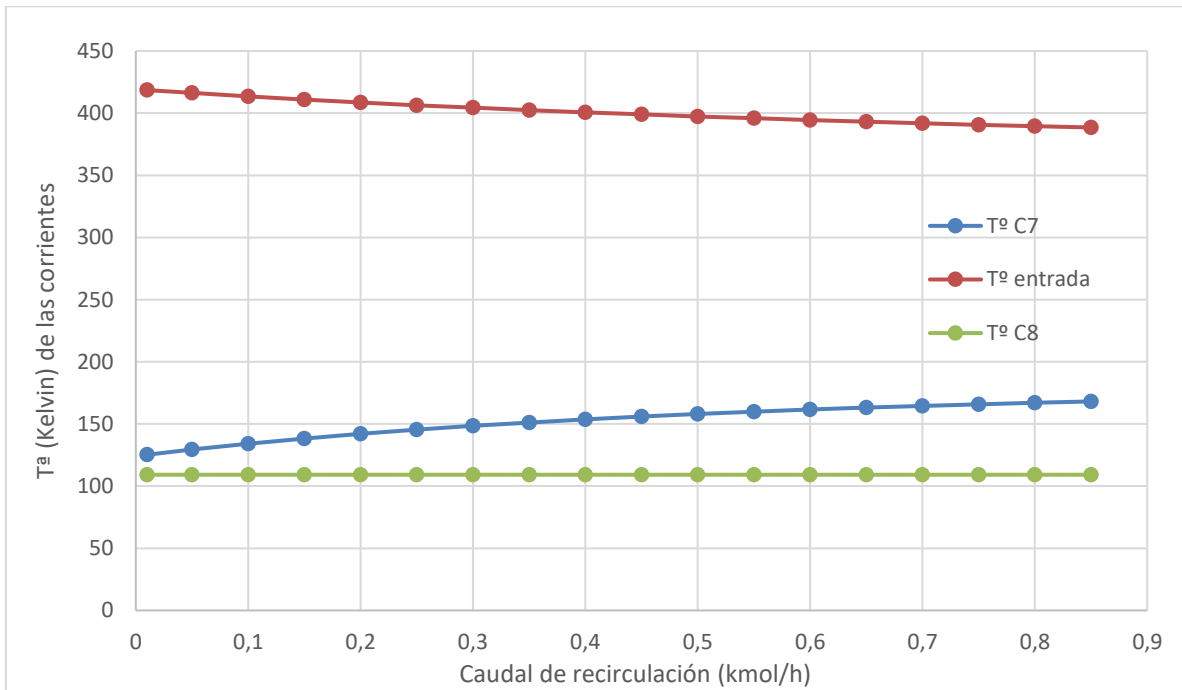


Figura 31. Temperaturas de las corrientes respecto del caudal de recirculación.

Tabla 5. Temperaturas y flujos según el flujo de recirculación.

Flujo recir (kmol/h)	Q inter. (KW)	W compr. (KW)	T ^a (K) C7	T ^a (K) C8	T ^a (K) entrada	GNL (Kmol/h)	EFG (Kmol/h)	Flujo Purga (Kmol/h)
0,01	3,07	0,02	125,22	109,15	418,54	0,871	0,139	0,129
0,05	3,12	0,10	129,35	109,15	416,19	0,871	0,179	0,129
0,1	3,18	0,21	134,02	109,15	413,45	0,871	0,229	0,129
0,15	3,24	0,31	138,21	109,15	410,92	0,871	0,279	0,129
0,2	3,30	0,41	141,97	109,15	408,57	0,871	0,329	0,129
0,25	3,36	0,52	145,37	109,15	406,38	0,871	0,379	0,129
0,3	3,42	0,62	148,43	109,15	404,33	0,873	0,429	0,129
0,35	3,48	0,72	151,2	109,15	402,42	0,871	0,479	0,129
0,4	3,53	0,83	153,71	109,15	400,63	0,871	0,529	0,129
0,45	3,59	0,93	155,98	109,15	398,95	0,871	0,579	0,129
0,5	3,65	1,04	158,04	109,15	397,37	0,871	0,629	0,129
0,55	3,71	1,14	159,82	109,15	395,88	0,871	0,679	0,129
0,6	3,77	1,24	161,62	109,15	394,47	0,871	0,729	0,129
0,65	3,83	1,35	163,17	109,15	393,14	0,871	0,779	0,129
0,7	3,89	1,45	164,58	109,15	391,88	0,871	0,829	0,129
0,75	3,95	1,55	165,87	109,15	390,68	0,871	0,879	0,129
0,8	4,01	1,65	167,04	109,15	389,55	0,871	0,929	0,122
0,85	4,07	1,75	168,11	109,15	388,47	0,871	0,979	0,122

A continuación, se realiza un estudio de la composición de cada componente de la corriente GNL frente a la cantidad de flujo que se recircula, representado en la Tabla 6. Lo que más destaca es que prácticamente todos los compuestos permanecen constantes.

Tabla 6. Flujo y composición de la corriente GNL según la recirculación.

Flujo recir (kmol/h)	Flujo GNL (Kmol/h)	%N2	%Met	%Et	%Prop	%n But	%isobut	%i Pentano
0,01	0,8708	0,0096	0,8929	0,0631	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,05	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,1	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,15	0,8708	0,0096	0,8293	0,0631	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,2	0,8708	0,0096	0,8293	0,0631	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,25	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,3	0,8728	0,0096	0,8929	0,0631	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,35	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,4	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,45	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,5	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,55	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,6	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,65	0,8708	0,0096	0,8929	0,0631	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,7	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,75	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,8	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,85	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010

También se realiza un estudio parecido en la corriente de EFG de la composición de cada componente frente a la cantidad de flujo que se recircula, representado en la Tabla 7.

Tabla 7. Flujo y composición de EFG según la recirculación.

Flujo recir (kmol/h)	Flujo EFG (Kmol/h)	%N2	%Met	%Et	%Prop	%n But	%isobut	%i Pentano
0,01	0,1392	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,05	0,1792	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,1	0,2292	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,15	0,2792	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,2	0,3292	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,25	0,3792	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,3	0,4292	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,35	0,4792	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,4	0,5292	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,45	0,5792	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,5	0,6292	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,55	0,6792	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,6	0,7292	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,65	0,7792	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,7	0,8292	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,75	0,8792	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,8	0,9292	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,85	0,9792	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009

Como se observa en la Tabla 6 y en la Tabla 7, la composición de las corrientes EFG y GNL no varía significativamente según se va aumentando la recirculación. Además, las corrientes de EFG y GNL tampoco se ven afectadas por los cambios en la recirculación tal y como se aprecia en la Tabla 5. El porcentaje de todos los compuestos permanece constante, cualquier variación es despreciable, y en el caso de los compuestos más pesados son prácticamente nulos. Lo que quiere decir que, si el porcentaje de nitrógeno es mayor a la entrada, mayor cantidad de nitrógeno saldrá por la corriente gaseosa, ya que se ha fijado el valor de la composición de nitrógeno que sale por la licuefacción, y en relación una proporción de metano mayor se irá con el sobrante de nitrógeno. Esto se debe a que, por el balance de materia, toda la materia que entra en la alimentación debe solamente sale por la corriente de GNL y de purga, y estas son la suma de la entrada. Aún que haya recirculación no afecta al flujo de materia en la salida, esto es porque se queda acumulado, fluyendo en el proceso en una constante recirculación.

Una vez analizados los anteriores datos, es interesante observar la energía gastada por cada máquina utilizada en el proceso. Tanto la válvula como el flash son aparatos que funcionan de forma natural con las leyes físicas de la termodinámica, y no incluyen ni intercambio de calor ni trabajo aportado o retirado. Por esta razón, quedan excluidas del siguiente estudio energético. A continuación, se expone el caso del intercambiador de calor y del compresor situado en la recirculación.

Para poder comparar realmente la potencia entre los equipos usados en el proceso de licuefacción, debe estar en las mismas unidades. Al cambiar las unidades de $1\text{cal/s}=4,187\text{W}$, se puede observar que cambios hay en los flujos térmicos del intercambiador con los del compresor, que están representados en la Figura 32.

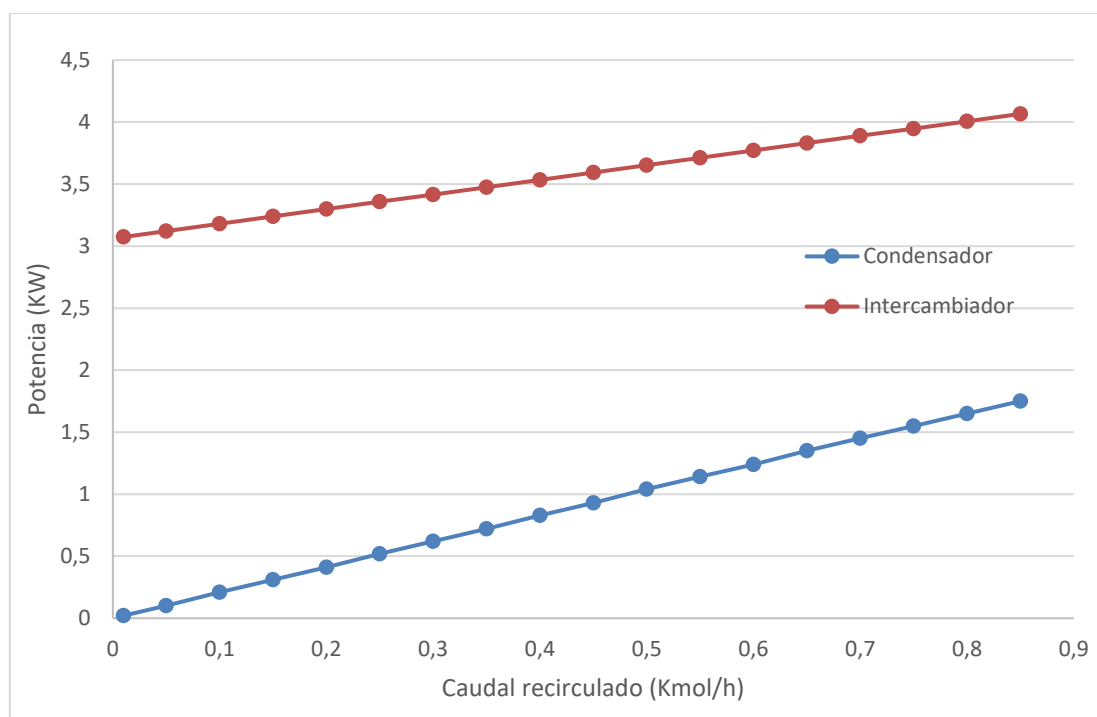


Figura 32. Evolución de la Potencia usada respecto del caudal de recirculación.

Se contempla como el gasto energético aumenta a mayor caudal en la recirculación. Hay que tener en cuenta que a mayor caudal a tratar el gasto será mayor en el

intercambiador, pero no tan grande como si se tratara desde el principio este mismo caudal de alimentación sin recirculación.

También hay que tener en cuenta que las pendientes de ambas rectas son diferentes. En el caso del condensador es una pendiente constante y sus valores aumentan según hay mayor cantidad de caudal recirculado. En el caso del intercambiador, la pendiente sigue siendo positiva, lo que indica que a mayor caudal a tratar la energía a usar será mayor. Pero la pendiente es menor que la del condensador, esto significa que a mayor caudal recirculado no necesita tanta energía en proporción a si se compara en el caso de tener que tratar el mismo caudal sin recirculación. Además, es importante resaltar que a mayor proporción de nitrógeno en la entrada del intercambiador es más fácil enfriar dicha corriente. Que cuanto mayor cantidad se recircula, pues la temperatura a la que se necesita llegar en la C7 es menor.

4.3- Compresor

El compresor tiene un salto de presión de 1 a 40 bar, y un salto de temperatura de 109,15 K a 72 K. Los compresores están diseñados para comprimir a altas presiones, pero usualmente no están especializados para soportar altas temperaturas. Es algo importante para tener en cuenta, puesto que, si es el caso de que sobrepasa la temperatura admisible por el compresor, habría que plantear otra recirculación. Se podría solucionar poniendo dos compresores en serie añadiendo un intercooler entre ambos compresores, con la intención de que baje la temperatura de la corriente para que no llegue a la temperatura máxima admisible por dichos compresores. Al limitar la temperatura de salida se disminuye la potencia usada por cada compresor, puesto que, si no sube tanto la temperatura en el proceso, la resistencia del gas es menor al pasar por el compresor. Para saber la presión intermedia entre ambos compresores (P2) se despejaría de la ecuación 20. De la cual conocemos que la relación debe ser constante, que la presión inicial del primer compresor (P1) es de 1 bar y que la presión de salida después del segundo compresor (P3) debe ser de 40 bares para ser recirculado.

$$\frac{P2}{P1} = \frac{P3}{P2}$$

Ec (20)

En estas simulaciones realizadas la temperatura mayor a la que se ha alcanzado por el compresor es de 72 K, que es inferior a la temperatura crítica de 473 K. Por lo que para este caso de recirculación no es necesario realizar más cambios, y el compresor planteado cumple con las características necesarias.

Las instalaciones de condensadores están reguladas por el Reglamento de equipos de presión y sus instrucciones técnicas complementarias, que están aprobados por el Real decreto 809/2021, desde el 21 de septiembre [21]. El compresor planteado en esta simulación ha de cumplir dicha normativa, tal y como viene especificado a continuación.

1. Las instalaciones deberán diseñarse teniendo en cuenta todos los factores pertinentes para garantizar la seguridad durante su vida prevista. El diseño incluirá los coeficientes adecuados de seguridad para prevenir de manera coherente todo tipo de fallos.

2. A efectos del presente reglamento, los equipos a presión del artículo 1 se asimilarán a las categorías indicadas en el artículo 13 y el anexo II del Real Decreto 709/2015, de 24 de julio.

No obstante, lo anterior, los equipos del artículo 1.2.c) únicamente se asimilarán a las categorías indicadas en el artículo 13 y el anexo II del Real Decreto 709/2015, de 24 de julio, cuando se utilicen de forma permanente en una instalación como si fueran un equipo fijo.

3. Las empresas instaladoras de equipos a presión, para poder realizar las actividades indicadas en el presente reglamento, deberán estar habilitadas para el ejercicio de la actividad según lo establecido en el anexo I.

4. Con carácter previo a la instalación, la empresa instaladora de equipos a presión comprobará la documentación técnica y las instrucciones de las y/o los fabricantes de los equipos.

Siguiendo la normativa específica para este caso se ha buscado un compresor con las características adecuadas. Se ha encontrado un modelo de compresor que encaja con este caso y se ha descrito todas sus características en la ficha técnica adjunta en los anexos 7.3 Ficha técnica del compresor.

4.4. Balance energético y económico

Tomando como referencia cuando el caudal de recirculación es de 5 kmol/h, el gasto marcado por el intercambiador (3,65 KW) y el compresor (1,04 KW), la suma es de 4,69 KWh. En comparación con el mismo proceso, pero sin la recirculación implantada, la energía gastada para las mismas condiciones sería de 5,02 KWh, como se ha comprobado en una simulación. La recirculación supone un ahorro energético del 6,52% respecto del sistema simple sin recirculación, como se muestra en las ecuaciones 21 y 22.

$$\frac{\text{Energía}_{gastada\ sin\ recir.} - \text{Energía}_{gastada\ con\ recir.}}{\text{Energía}_{gastada\ sin\ recir.}} \quad Ec\ (21)$$

$$\frac{5,02 - 4,69}{5,02} * 100 = 6,52\% \quad Ec\ (22)$$

Para optimizar el proceso se puede utilizar la corriente de purga como combustible para alimentar la energía necesaria tanto para el compresor de la recirculación como para el sistema de refrigeración. En concreto esta corriente de purga tiene un caudal de 121.98 mol/h, al ser mayoritariamente metano (75,41% CH₄ sacado de la Tabla 7), sale un caudal de 0,092 kmol/h de metano. Siendo el poder calorífico del metano de 25.224 KWh/mol, esta corriente podría dar una energía 2,32 KWh. Si a este valor energético obtenido por la quema de la purga se le resta al valor necesario para mantener el proceso entre compresor e intercambiador, el gasto energético se queda en 2,37KW, Esto es un gasto energético mucho menor a la energía necesaria sin la recirculación planteada, que en este caso es la mitad de la energía que se necesita.

Finalmente se obtiene un ahorro energético del 47,8%, como se demuestra en las ecuaciones 23 y 24. Esto es lo que se consigue ahorrar en energía si a la operación de licuefacción se añade una recirculación y además se quema la purga, respecto del mismo sistema sin recirculación, ni quema de la purga.

$$\frac{\text{Energía}_{\text{consumida total}} - \text{Energía}_{\text{obtenida de quema de purga}}}{\text{Energía}_{\text{gastada sin recir.}}} \quad Ec (23)$$

$$\frac{2,37}{5,02} * 100 = 47,26\% \quad Ec (24)$$

Esta situación conlleva una gran ventaja también a nivel económico, puesto que esa cantidad de energía “no gastada” (resta de sin recirculación menos energía gastada en recirculación quitada ya la obtenida con la purga) sería equivalente a 11,85€ por hora, siendo el precio de la electricidad de 0,2237€/KWh un promedio del precio en mayo de 2023.

Ya se ha demostrado que recircular la corriente EFG disminuye la temperatura a la que se necesita llegar en la corriente 7 para que se siga cumpliendo la condición de que el porcentaje de nitrógeno el GNL sea menor al 1%. Con lo que se consigue que el gasto de la transmisión de calor sea menor. En los datos obtenidos en la Tabla 5 no parece que se vea reflejado, puesto que el valor de energía que hay que retirar es mayor, pero es debido a que cada vez es una corriente aún mayor. Si se quisiera alimentar el sistema con el mismo caudal de mezcla, pero estando en las mismas condiciones a las que entra el GN, se debería gastar una cantidad considerablemente mayor de energía para retirar mayor cantidad de calor de dicha corriente.

5.- Conclusiones

En lo referente a la simulación sin recirculación, con diferentes perturbaciones en la composición del nitrógeno en la alimentación, se puede asimilar las siguientes conclusiones:

- + A menor cantidad de nitrógeno a la entrada es más complicado de retirarlo.
- + Para obtener la condición de <1% nitrógeno en GNL, las condiciones iniciales en el flash deben ser iguales.
- + A mayor cantidad de nitrógeno en el intercambiador es más sencillo enfriar la corriente.

Por otro lado, la simulación con diferentes caudales de recirculación ha demostrado lo siguiente:

- + Para obtener la condición de <1% nitrógeno en GNL, las condiciones iniciales en el flash deben ser iguales.
- + Cuanto mayor caudal de recirculación hay en la corriente de entrada, más fácil es enfriar dicho caudal.
- + A mayor cantidad de corriente recirculada, se necesita una temperatura menor a la salida del intercambiador, y el salto de temperatura en la válvula es mayor.

Otro punto de vista es desde el nivel energético. Se ha observado la variación de la potencia utilizada según el caudal de recirculación y se ha visto lo siguiente:

- + Se puede realizar la recirculación con un solo compresor que cumple las regulaciones dichas en el Real Decreto 809/2021, del reglamento de equipos a presión.
- + Reaprovechando la energía del caudal de purga supone un ahorro energético y económico importante del 47,26%, respecto del mismo proceso sin recirculación ni con la quema de la purga.

6.- Bibliografía

- [1] *¿Cómo se obtiene el Gas Natural? | Blog | Nedgia.* (n.d.). Retrieved June 22, 2023, from <https://www.nedgia.es/blog-gas-natural/como-se-obtiene-gas->
- [2] Korpyś, M., Wójcik, J., & Synowiec, P. (n.d.). *Methods for sweetening natural and shale gas.* <http://www.odolanow.pgnig.pl/odolanow/produkty/ghe>
- [3] *Gas natural. Qué es, cómo se produce - Calderas Gas.* (n.d.). Retrieved June 24, 2023, from <https://www.calderasbaratasgas.com/gas-natural/como-se-produce>
- [4] *Qué es el fracking y cómo funciona - Resumen.* (n.d.). Retrieved June 26, 2023, from <https://www.ecologiaverde.com/que-es-el-fracking-y-como-funciona-3680.html>
- [5] *INFORME ANUAL.* (n.d.).
- [6] *Natural gas explained - U.S. Energy Information Administration (EIA).* (n.d.). Retrieved June 23, 2023, from <https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/>
- [7] Alonso-Borrego, N. (2023). papel del gas natural licuado en la seguridad de suministro de gas natural en España. *Boletín Económico de ICE, 3157.* <https://doi.org/10.32796/bice.2023.3157.7580>
- [8] *Estadísticas de consumo de gas natural | Datos sobre gas natural | Enerdata.* (n.d.). Retrieved June 28, 2023, from <https://datos.enerdata.net/gas-natural/consumo-mundial.html>
- [9] *Sedigas – Demanda.* (n.d.). Retrieved June 29, 2023, from <https://www.sedigas.es/informeannual/2021/el-gas-en-espana/consumo/demanda/>
- [10] *Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico - Gas Natural y Medio Ambiente.* (n.d.). Retrieved June 29, 2023, from <https://energia.gob.es/gas/Gas/Paginas/gasnatural.aspx#:~:text=El%20gas%20natural%20como%20cualquier,de%20las%20del%20fuel%20oil>
- [11] Gao, L., Wang, J., Binama, M., Li, Q., & Cai, W. (2022). The Design and Optimization of Natural Gas Liquefaction Processes: A Review. In *Energies* (Vol. 15, Issue 21). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en15217895>
- [12] *bp-energy-outlook-2013.* (n.d.).
- [13] Blázquez, J., & Martín-Moreno, J. M. ^a. (n.d.). *EL FUTURO DEL PETRÓLEO Y EL GAS NATURAL EN ESCENARIOS GLOBALES DE RÁPIDA DESCARBONIZACIÓN.*
- [14] *Informe anual del Mercado Organizado de Gas 2 0 2 2.* (n.d.).
- [15] *El Sistema Gasista Español.* (n.d.).

- [16] *Informe anual 2021 El gas en España*. (n.d.).
- [17] *Outlooks for gas markets and investment*. (n.d.). Retrieved June 26, 2023, from www.iea.org
- [18] Mokhatab, Saeid, Mak, John Y, Valappil, & Jaleel V. (2013). *Liquefied Natural Gas*.
- [19] Venkatarathman, G., K. D. Timmerhaus, & C. Rizzuto. (2008). *Cryogenic Mixed Refrigerant Processes* (1ts ed.).
- [20] *Finding the Right Combination of LNG Subcooling and End-Flash*. (n.d.).
- [21] *BOE-A-2021-16407 Real Decreto 809/2021, de 21 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento de equipos a presión y sus instrucciones técnicas complementarias*. (n.d.). Retrieved June 29, 2023, from https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2021-16407
- [22] *proceso_SMR_GT_PFD*. (n.d.).
- [23] *proceso_SMR_IC_PFD*. (n.d.).
- [24] *proceso_SMR_PFD*. (n.d.).
- [25] *Tendencias Energéticas Mundiales, 2023*. (n.d.). Retrieved June 29, 2023, from <https://es.enerdata.net/publicaciones/informes-energeticos/tendencias-energeticas-mundiales.html>
- [26] *Compresor centrifugo - TURBO-GAS 6040 - INGERSOLL RAND - de nitrógeno / de gas natural / con motor eléctrico*. (n.d.). Retrieved June 27, 2023, from <https://www.directindustry.es/prod/ingersoll-rand/product-5703-1878283.html>

7.- Anexo tablas, gráficas, ficha técnica del compresor

7.1 Gráficas

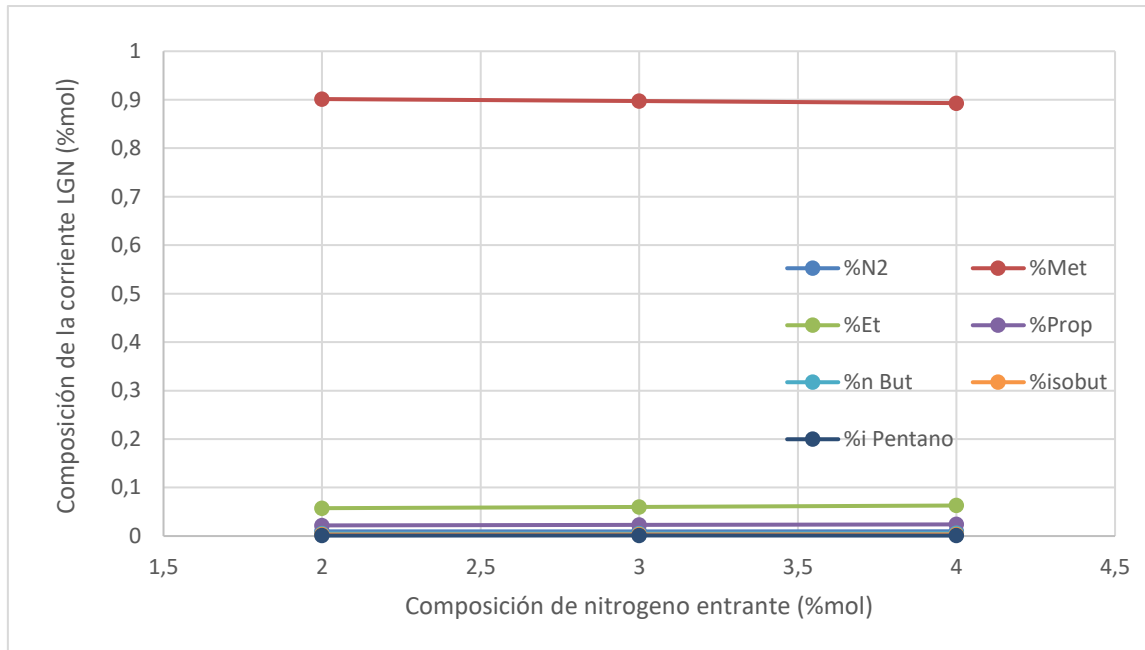


Figura 33. Composición en moles de los compuestos frente a la variación de N_2 .

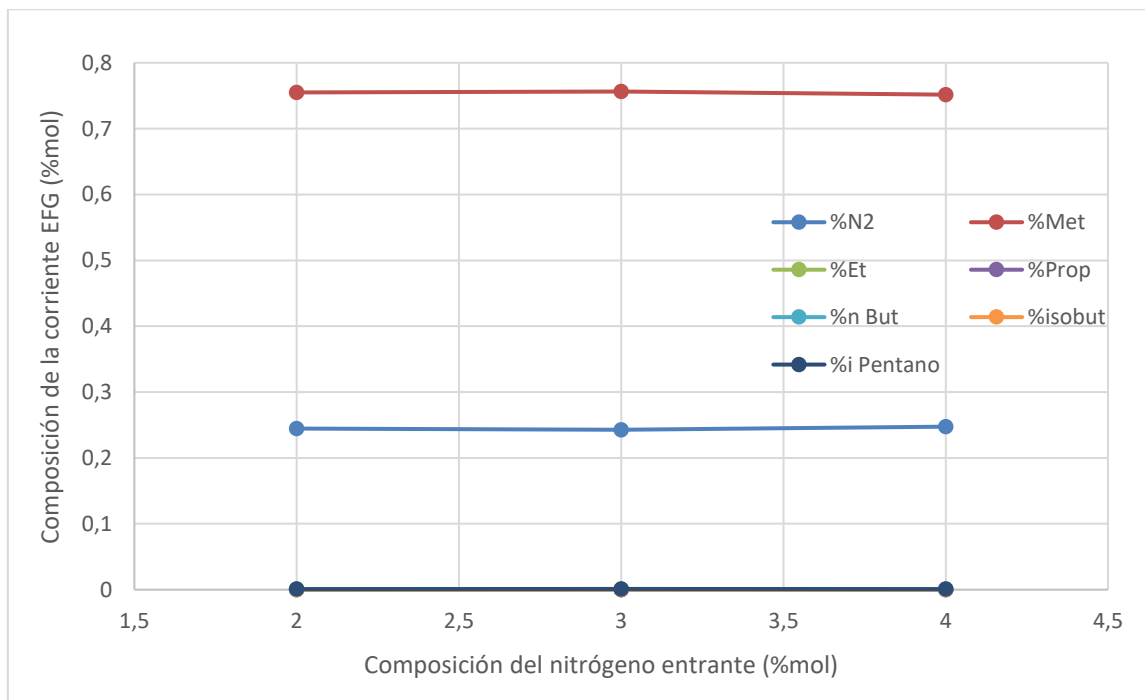


Figura 34. Composición de EFG según la composición de nitrógeno entrante.

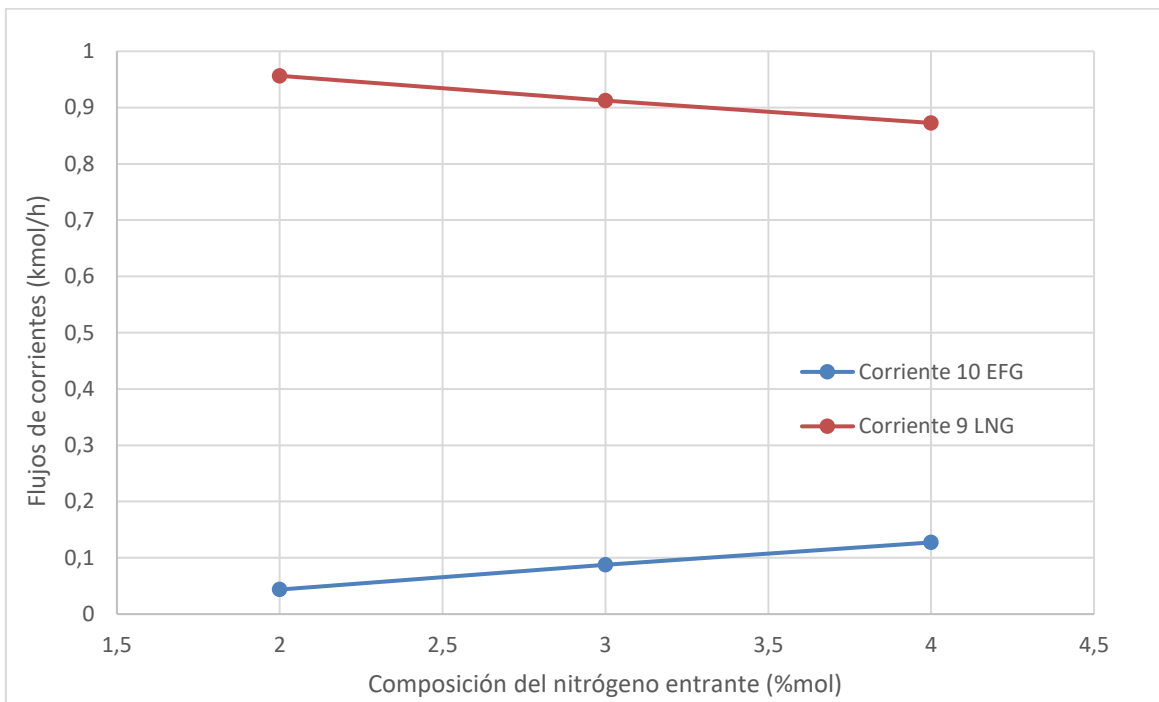


Figura 35. Evolución de los flujos según el nitrógeno entrante.

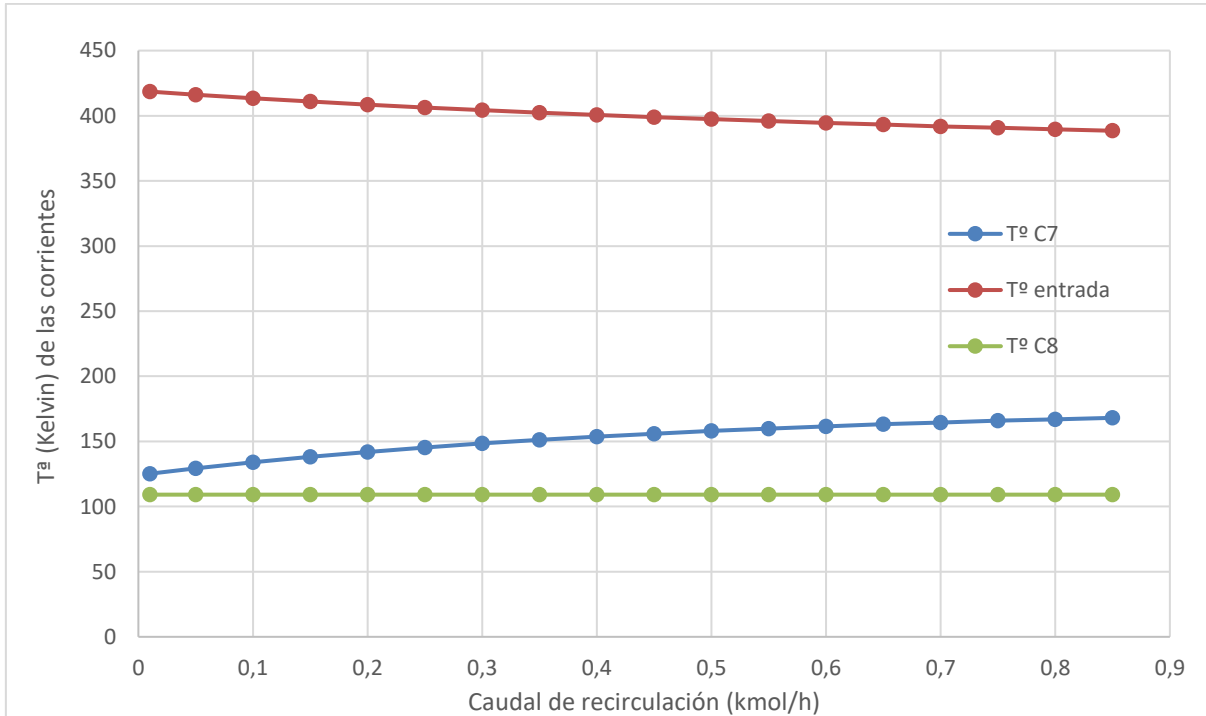


Figura 36. Temperaturas de las corrientes respecto del caudal de recirculación.

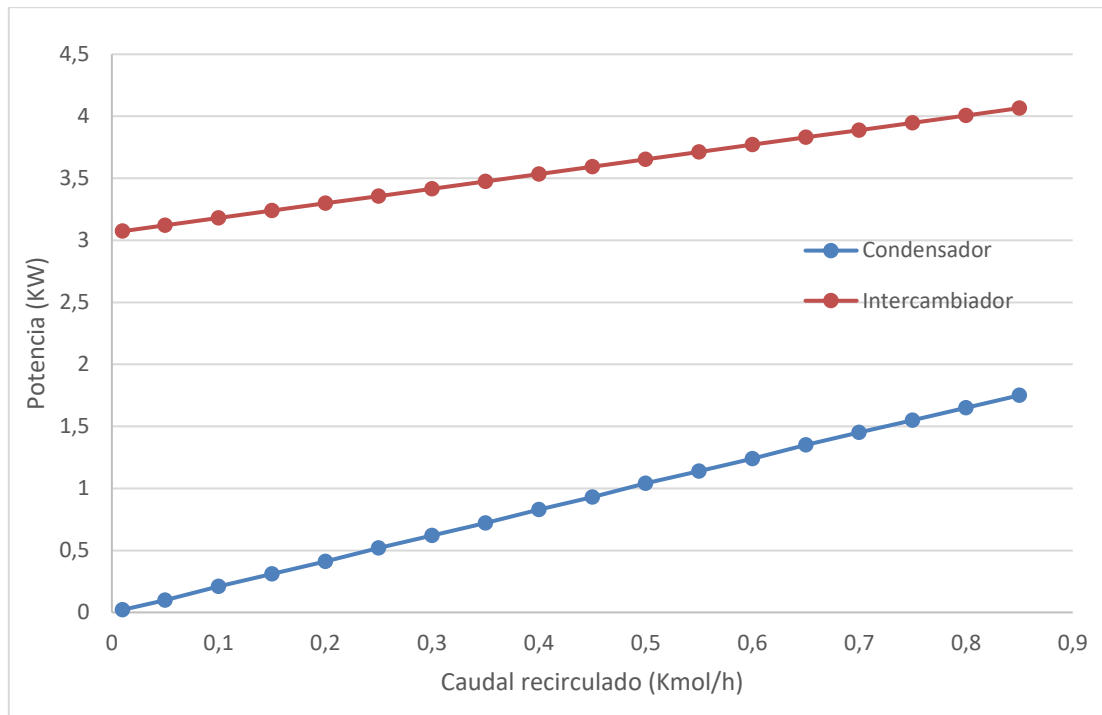


Figura 37. Evolución de la Potencia usada respecto del caudal de recirculación.

7.2 Tablas

Tabla 8. Típica composición del GN [2].

Compound	Molar fraction
Hydrocarbons	
Methane	0.75 – 0.99
Ethane	0.01 – 0.15
Propane	0.01 – 0.10
<i>n</i> -Butane	0.00 – 0.02
Isobutene	0.00 – 0.01
<i>n</i> -Pentane	0.00 – 0.01
Isopentane	0.00 – 0.01
Hexane	0.00 – 0.01
Heptane plus higher hydrocarbons	0.00 – 0.001
Nonhydrocarbons	
Nitrogen	0.00 – 0.15
Carbon dioxide	0.00 – 0.30
Hydrogen sulfide	0.00 – 0.30
Helium	0.00 – 0.05

Tabla 9. Variación de flujos y temperaturas según el %N₂ entrante.

%N ₂ entrada	Q inter (kW)	T ^a (K) C7	T ^a (K) C8	GNL (Kmol/h)	EFG (Kmol/h)
4	3,062	124,13	109,15	0,8727	0,1273
3	3,119	118,83	109,15	0,9125	0,0875
2	3,177	113,35	109,15	0,9564	0,0436

Tabla 10. Composición de la corriente GNL

		Corriente 9 NGL						
%N ₂ entrada	%N ₂	%Met	%Et	%Prop	%n But	%isobut	%i Pentano	
4	0,0097	0,8930	0,0630	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010	
3	0,0096	0,8973	0,0603	0,0230	0,0055	0,0033	0,0010	
2	0,0098	0,9014	0,0575	0,0220	0,0052	0,0031	0,0010	

Tabla 11. Composición de la corriente EFG.

		Corriente 10 EFG						
%N ₂ entrada	%N ₂	%Met	%Et	%Prop	%n But	%isobut	%i Pentano	
4	0,2475	0,7516	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009	
3	0,2428	0,7563	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009	
2	0,2444	0,7547	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0008	

Tabla 12. Temperaturas y flujos según el flujo de recirculación.

Flujo recir (kmol/h)	Q inter. (KW)	W compr. (KW)	T ^a (K) C7	T ^a (K) C8	T ^a (K) entrada	GNL (Kmol/h)	EFG (Kmol/h)	Flujo Purga (Kmol/h)
0,01	3,07	0,02	125,22	109,15	418,54	0,871	0,139	0,129
0,05	3,12	0,10	129,35	109,15	416,19	0,871	0,179	0,129
0,1	3,18	0,21	134,02	109,15	413,45	0,871	0,229	0,129
0,15	3,24	0,31	138,21	109,15	410,92	0,871	0,279	0,129
0,2	3,30	0,41	141,97	109,15	408,57	0,871	0,329	0,129
0,25	3,36	0,52	145,37	109,15	406,38	0,871	0,379	0,129
0,3	3,42	0,62	148,43	109,15	404,33	0,873	0,429	0,129
0,35	3,48	0,72	151,2	109,15	402,42	0,871	0,479	0,129
0,4	3,53	0,83	153,71	109,15	400,63	0,871	0,529	0,129
0,45	3,59	0,93	155,98	109,15	398,95	0,871	0,579	0,129
0,5	3,65	1,04	158,04	109,15	397,37	0,871	0,629	0,129
0,55	3,71	1,14	159,82	109,15	395,88	0,871	0,679	0,129
0,6	3,77	1,24	161,62	109,15	394,47	0,871	0,729	0,129
0,65	3,83	1,35	163,17	109,15	393,14	0,871	0,779	0,129
0,7	3,89	1,45	164,58	109,15	391,88	0,871	0,829	0,129
0,75	3,95	1,55	165,87	109,15	390,68	0,871	0,879	0,129
0,8	4,01	1,65	167,04	109,15	389,55	0,871	0,929	0,122
0,85	4,07	1,75	168,11	109,15	388,47	0,871	0,979	0,122

Tabla 13. Flujo y composición de la corriente GNL según la recirculación.

Flujo recir (kmol/h)	Flujo GNL (Kmol/h)	%N2	%Met	%Et	%Prop	%n But	%isobut	%i Pentano
0,01	0,8708	0,0096	0,8929	0,0631	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,05	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,1	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,15	0,8708	0,0096	0,8293	0,0631	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,2	0,8708	0,0096	0,8293	0,0631	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,25	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,3	0,8728	0,0096	0,8929	0,0631	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,35	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,4	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,45	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,5	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,55	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,6	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,65	0,8708	0,0096	0,8929	0,0631	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,7	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,75	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,8	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010
0,85	0,8708	0,0096	0,8929	0,0632	0,0241	0,0057	0,0034	0,0010

Tabla 14. Flujo y composición de EFG según la recirculación.

Flujo recir (kmol/h)	Flujo EFG (Kmol/h)	%N2	%Met	%Et	%Prop	%n But	%isobut	%i Pentano
0,01	0,1392	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,05	0,1792	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,1	0,2292	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,15	0,2792	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,2	0,3292	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,25	0,3792	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,3	0,4292	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,35	0,4792	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,4	0,5292	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,45	0,5792	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,5	0,6292	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,55	0,6792	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,6	0,7292	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,65	0,7792	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,7	0,8292	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,75	0,8792	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,8	0,9292	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009
0,85	0,9792	0,2449	0,7542	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009

7.3 Ficha técnica del compresor

Ficha técnica del compresor de la empresa [26]

Compresor centrífugo TURBO-GAS 6040



CARACTERÍSTICAS

Tecnología	centrífugo
Tipo	de nitrógeno, de gas natural
Accionamiento	con motor eléctrico
Instalación / movilidad	estacionario
Lubricación	sin aceite
Ámbito de aplicación	industrial
Presión	Máx.: 42 bar (609,16 psi) Mín.: 0 bar (0 psi)
Caudal	Máx.: 167 m ³ /min (5.897,55 ft ³ /min) Mín.: 127 m ³ /min (4.484,96 ft ³ /min)
Potencia	Máx.: 1.270 kW (1.726,72 hp) Mín.: 0 kW (0 hp)

WHY CHOOSE TURBO-GAS COMPRESSORS?

- Prevents oil contamination of your system
- Reduces NOX and carbon footprint

High Reliability

- Patented non-contacting gas seal design
- Conservative gearing design
- Stainless steel compression elements
- Patented, low-pressure hydrostatic squeeze-film pinion bearings
- Centrifugal compressors are proven to have a long mean time between failures (MTBF), and independent research has shown an industry-leading availability of 99.7%.

Easy, Low Cost Maintenance

- Compression elements do not wear or require periodic replacement

Simple Installation

- Compact design offers minimum number of connections
- No foundations required
- Complete package ready for plug-and-play

Applications and Industries Served

- Gas Boosting
- Renewable Energy
- Air Separation
- Power Generation
- Chemical
- Petrochemicals
- Mining
- Gas Processing
- Siloxane Removal
- Multiple Process

Gases Handled

- Landfill Gas
- Biogas
- Natural Gas
- Digester Gas
- CO
- CO₂
- Nitrogen

Specification	Metric	Imperial
Standard Input Power	up to 1270 kW	up to 1700 hp
Discharge Pressure	up to 42 barg	up to 610 psig
Inlet Flow	127 to 167 m ³ /min	4500 to 6000 CFM

